



BARLEY YELLOW DWARF VIRUS EM TRIGO NO BRASIL

Douglas Lau^{1*}, Talita Bernardon Mar², Fabio Nascimento Silva³, Thor Vinícius Martins Fajardo⁴, Antonio Nhani Junior⁵, Fernando Sartori Pereira⁶, Lucas Antonio Stempkowski⁷

RESUMO

A história do barley yellow dwarf virus (BYDV) no Brasil começou a ser oficialmente relatada em 1968 quando sintomas de amarelecimento em trigo foram atribuídos a esse agente etiológico. A data exata da introdução do vírus no Brasil não é conhecida, mas plantas com sintomas similares aos causados pelo vírus e os afídeos vetores já haviam sido reportados décadas antes do diagnóstico oficial. Após a identificação do BYDV no Rio Grande do Sul, o vírus também foi constatado nas demais regiões tritícolas de Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Distrito Federal e Minas Gerais. Essa história será explorada sob dois pontos de vista. Primeiro, considerando a descrição da variabilidade da população viral de acordo com os métodos e tecnologias de detecção e diagnose disponíveis em cada época e, segundo, analisando os impactos das mudanças na paisagem agrícola brasileira e de práticas de manejo na epidemiologia viral.

PALAVRAS-CHAVE: barley yellow dwarf virus, *Luteovirus*, *Tombusviridae*, cereal yellow dwarf virus, *Solemoviridae*, afídeos, *Aphididae*, gramíneas, *Triticum aestivum*, *Hordeum vulgare*, *Avena* spp.

ABSTRACT

The history of the barley yellow dwarf virus (BYDV) in Brazil began to be officially reported in 1968 when symptoms of yellowing in wheat were attributed to this etiological agent. The exact date of introduction of the virus in Brazil is unknown, but plants with symptoms similar to those caused by the virus and the aphid vectors had already been reported decades before the official diagnosis. After the identification of BYDV in Rio Grande do Sul, the virus was also found in other wheat regions in Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Distrito Federal and Minas Gerais. This history will be explored from two points of view. First, considering the description of the variability of the viral population according to the detection and diagnosis methods and technologies available at each time, and second, analyzing the impacts of changes in the Brazilian agricultural landscape and management practices on viral epidemiology.

KEYWORDS: barley yellow dwarf virus, *Luteovirus*, *Tombusviridae*, cereal yellow dwarf virus, *Solemoviridae*, aphids, *Aphididae*, grasses, *Triticum aestivum*, *Hordeum vulgare*, *Avena* spp.

BARLEY YELLOW DWARF VIRUS IN WHEAT IN BRAZIL

¹Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS 99050-970, Brasil. ²Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS 99050-970, Brasil. Trabalho de revisão realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através da concessão da bolsa Pós-Doutorado Júnior 166321/2020-6. ³Universidade do Estado de Santa Catarina, 88520-000, Lages, Santa Catarina, Brasil. ⁴Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves, RS 95701-008, Brasil. ⁵Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP 13083-886, Brasil. ⁶Universidade do Estado de Santa Catarina, 88520-000, Lages, Santa Catarina, Brasil. Bolsa Doutorado CAPES 88882.447347/2019-01. ⁷Departamento de Fitopatologia/BIOAGRO, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 36570-900, Brasil. Doutorando CNPq 140932/2019-4. *Autor para correspondência: Douglas Lau (douglas.lau@embrapa.br).

INTRODUÇÃO

A história do barley yellow dwarf virus (BYDV) no Brasil começou a ser oficialmente relatada em 1968 quando sintomas de amarelecimento em trigo (*Triticum aestivum* L.) foram atribuídos a esse agente etiológico (CAETANO 1968; CAETANO 1972). A data exata da introdução do vírus no Brasil não é conhecida, mas Caetano descreve em seu artigo que a ocorrência de “uma amarelidão nos trigos do Rio Grande do Sul, já fora observada em 1929 por técnicos da Estação Fitotécnica da Fronteira e estudada em 1932 por Von Parceval”. Os sintomas de amarelecimento típicos dessa virose eram atribuídos a fatores não bióticos, como carências nutricionais, falta ou excesso de umidade no solo, geadas entre outros (PARCEVAL 1939). Quanto aos afídeos (Hemiptera: Aphididae) vetores, popularmente denominados “pulgões”, Pimenta & Smith (1976) realizaram um levantamento bibliográfico que revela relatos de afídeos de cereais no Brasil, principalmente trigo, desde 1928. Uma das primeiras espécies encontrada com frequência e considerada praga do trigo no Rio Grande do Sul, onde a cultura se expandia, era *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852) (BERTELS 1956). Sucessivamente, novas espécies de afídeos que se revelaram vetoras de BYDV foram sendo reportadas, sobretudo, nas décadas de 60 e 70 (BERTELS 1970; BERTELS 1974; FEHN 1970; FEHN 1974; PIMENTA & SMITH 1976). Quando Caetano (1968) demonstrou a transmissão do agente etiológico por afídeos, ele utilizou *S. graminum* e uma outra espécie que ainda não havia sido identificada a qual teve uma eficiência de transmissão de 92 %. Fato é que após a sua identificação no Rio Grande do Sul, o vírus e a doença, que ficou popularmente conhecida como “nanismo amarelo da cevada”, também foram constatados nas demais regiões tritícolas de Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Distrito Federal e Minas Gerais (CAETANO & GOLO, 1980; CAETANO 1982).

A história do BYDV no Brasil será explorada sob dois pontos de vista. Primeiro considerando a descrição e identificação da população viral de acordo com os métodos e tecnologias de detecção e diagnose disponíveis em cada época e, segundo, analisando os impactos das mudanças na paisagem agrícola brasileira e práticas de manejo introduzidas na epidemiologia viral. O diagnóstico e a descrição da variabilidade das espécies de BYDV, que ocorrem no Brasil, podem ser separados em três fases: bioló-

gica, sorológica e molecular.

Para compreensão desse texto é importante esclarecer que BYDV foi originalmente identificado por Oswald & Houston (1951). Posteriormente, diferenças biológicas entre isolados de BYDV foram caracterizadas por Rochow (1969, 1971). Como essas diferenças estavam relacionadas a preferência de transmissão por afídeos vetores, os isolados virais receberam acrônimos relacionando ao vetor: RPV (*Rhopalosiphum padi* virus), RMV (*Rhopalosiphum maidis* virus), MAV (*Sitobion (Macrosiphum) avenae* virus), SGV (*Schizaphis graminum* virus) e PAV (*R. padi*) *avenae* (*S. avenae*) virus). Tais isolados podiam ser distinguidos sorologicamente, mas como revisado por Miller & Rasochová (1997) as propriedades de transmissão por afídeos nem sempre estavam estritamente relacionadas a um sorotipo. Diferenças citopatológicas, sorológicas e mais claramente diferenças na organização do genoma apontavam que os sorotipos PAV, MAV e SGV e isolados similares pertenciam ao grupo que foi classificado no gênero *Luteovirus* (mantendo-se o acrônimo BYDV), enquanto que RPV e RMV e isolados similares foram agrupados no gênero *Polerovirus* sendo renomeados como cereal yellow dwarf virus (CYDV) (MILLER & RASOCHOVÁ 1997). Como detalhado na revisão de Stempkowski et al (2022) atualmente estão aceitas pelo Comitê Internacional de Taxonomia de Vírus oito espécies que infectam trigo; no gênero *Luteovirus*: *Barley yellow dwarf virus-PAV*, *Barley yellow dwarf virus-MAV*, *Barley yellow dwarf virus-PAS*, *Barley yellow dwarf virus-kerII* e *Barley yellow dwarf virus-kerIII*; no gênero *Polerovirus* estão classificadas as espécies *Cereal yellow dwarf virus-RPS*, *Cereal yellow dwarf virus-RPV* e *Maize yellow dwarf virus-RMV*; as espécies *Barley yellow dwarf virus-GPV* e *Barley yellow dwarf virus-SGV* não foram classificadas em nenhum gênero (LEFKOWITZ et al. 2018). Nessa revisão, esse grupo de vírus será tratado como BYDV, fazendo menção as espécies quando necessário.

FASE BIOLÓGICA

A fase biológica corresponde ao período entre 1960 até ao final dos anos 1980. Nesta fase, o diagnóstico e os estudos de variabilidade da população viral eram baseados em testes de transmissão por afídeos vetores e determinação da gama de plantas hospedeiras. Essa época também foi marcada pela descrição detalhada dos sintomas em dife-

rentes plantas hospedeiras e por estudos de caracterização da reação de cultivares de trigo (CAETANO & CAETANO, 1972) e outros cereais, como cevada (*Hordeum vulgare* L.) (CAETANO & VIEGAS 1980), ao BYDV, o que permitiu descobrir fontes de tolerância que passaram a ser empregadas em programas de melhoramento. O principal pesquisador brasileiro a frente desses estudos pioneiros foi o Dr. Vanderlei da Rosa Caetano. Em sua valiosa tese de doutorado de 1972, são detalhadas a distribuição e perdas causadas por BYDV no Rio Grande do Sul, a gama de plantas hospedeiras, testes de resistência e tolerância de cultivares de trigo, descrições da sintomatologia, testes de transmissão com afídeos vetores e avaliação de medidas de controle. Para aqueles que desejam obter detalhes sobre esse patossistema no final de 1960 e início dos anos 1970, a leitura desse trabalho é altamente recomendável. A seguir, nessa revisão apresentamos alguns dados obtidos por Caetano (1972).

Nessa época, foi demonstrado por meio de testes de transmissão que 25 espécies de gramíneas eram suscetíveis ao vírus, sendo que 20 mostraram sintomas e cinco foram portadoras sem sintomas (Tabela 1) (CAETANO 1972). Nessa mesma época, em outros países, mais de 100 espécies de gramíneas já haviam se mostrado suscetíveis ao BYDV.

Em seu trabalho de 1968, Caetano descreve em detalhes a sintomatologia em trigo, aveia e cevada. Sugerimos a consulta dessas descrições diretamente no texto original. Aqui sintetizamos, ressaltamos e ilustramos alguns aspectos para entendimento do leitor. Em trigo, nas folhas destaca-se o amarelecimento que evolui, principalmente nas extremidades (Figura 1A). No colmo, as plantas infectadas apresentam redução de crescimento conferindo à planta um porte menor que o das saudáveis; os perfilhos, quando as plantas são inoculadas na fase de duas folhas, são poucos e de tamanho reduzido e; da mesma forma, nas espigas há uma redução de tamanho (Figura 1B). Nas raízes, há uma redução no desenvolvimento proporcional ao da parte aérea. Em aveia, as folhas exibem coloração próxima do alaranjado, vermelho-alaranjado ou vermelho-vinho (Figura 1C); no colmo ocorre uma redução do crescimento; os perfilhos são fracos e de pouco crescimento; nas panículas, há produção de espiguetas abortadas, atrofiadas e esbranquiçadas, principalmente na base da panícula e; as raízes apresentam crescimento reduzido. Em cevada, nas

Tabela 1. Espécies de plantas suscetíveis ao barley yellow dwarf virus testadas em Pelotas, em condição de estufa (CAETANO 1972; 1982)

Espécie	Sintomas
<i>Avena sativa</i> L.*	+
<i>Avena sterilis</i> L.*	+
<i>Avena strigosa</i> Schreb.*	+
<i>Axonopus compressus</i> (SW) Beauv*	+
<i>Chloris gayana</i> Kunth	-
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	-
<i>Dactylis glomerata</i> L.	+
<i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scop*	+
<i>Echinochloa crus-galli</i> (L.) Beauv.	+
<i>Festuca arundinaceae</i> Schreb.	-
<i>Festuca rubra</i> L.	-
<i>Holcus lanatus</i> L.	+
<i>Lolium multiflorum</i> Lam.*	+
<i>Lolium perene</i> L.	+
<i>Oryza sativa</i> L.*	+
<i>Paspalum notatum</i> Flügge	+
<i>Phalaris tuberosa</i> L.	-
<i>Pennisetum clandestinum</i> Hochst. & Chiov.*	+
<i>Poa annua</i> L.*	+
<i>Poa pratensis</i> L.	+
<i>Secale cereale</i> L.*	+
<i>x Triticosecale</i> sp. Wittmack ex A. Camus	+
<i>Triticum aestivum</i> L.*	+
<i>Triticum durum</i> Desf.*	+
<i>Zea mays</i> L.	+

* Também recuperado o vírus de plantas naturalmente infectadas, nesse caso, as gramíneas foram coletadas no Rio Grande do Sul; afídeos livres de vírus foram colocados para se alimentar sobre as plantas (10 pulgões por planta, período de aquisição de 48 horas) e, a seguir, transferidos para plantas teste por 72 horas. As plantas indicadoras foram aveia La Prevision e IAS 2 e trigo Lagoa Vermelha. Também foi realizada inoculação em casa de vegetação de cada espécie de gramínea; nas espécies nas quais não houve sintomas, foram realizadas tentativas de recuperação do vírus para saber se eram portadoras assintomáticas. + Sintomas presentes; - Sintomas ausentes

folhas há um amarelecimento que se inicia pela extremidade e margens evoluindo para o interior do limbo (Figura 1D); no colmo ocorre redução de crescimento em relação às plantas saudáveis; os perfilhos têm pouco vigor e podem ser improdutivos; as espigas têm tamanho bem menor do que em plantas

não infectadas e; raízes apresentam crescimento bem inferior comparativamente à testemunha.

Essas gramíneas, em sua maioria, também eram hospedeiras de afídeos. Como mencionado anteriormente, Pimenta & Smith (1976) realizaram

um levantamento bibliográfico sobre os relatos de afídeos de cereais no Brasil, principalmente em trigo (Figura 2). A primeira espécie relatada no Brasil foi *S. graminum*, com registros desde a década 1920. Esse foi o principal pulgão do trigo até as décadas de 1960

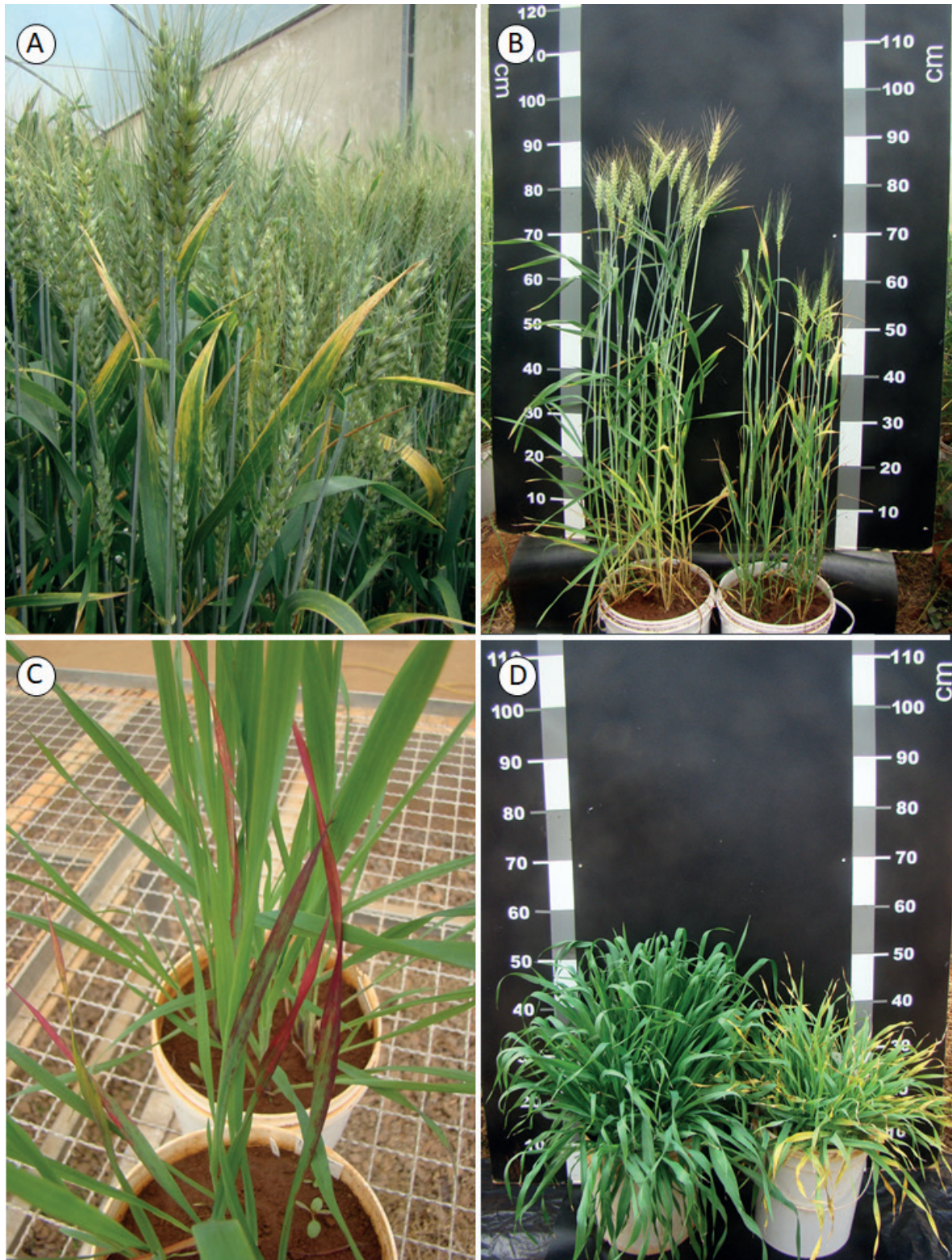


Figura 1. Sintomas e danos causados por barley yellow dwarf virus (BYDV) em cereais de inverno. A) Sintomas foliares em trigo. B) Sintomas e danos ao desenvolvimento da planta em trigo. C) Sintomas foliares em aveia preta. D) Sintomas e danos ao desenvolvimento da planta em cevada. Nas figuras B e D as plantas à esquerda são saudáveis e as plantas à direita foram inoculadas com BYDV-PAV no estágio de duas folhas expandidas. (Fotos Douglas Lau).

quando outras espécies foram relatadas e passaram a ocorrer com frequência. Outra espécie com registro entre 1930 e 1960 era *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856). Entre 1960 e 1970, foram reportadas no Brasil *Metopolophium dirhodum* (Walker, 1849) (Figura 3A) e *Sitobion avenae* (Fabricius, 1775), que se tornam as espécies mais importantes para a cultura do trigo no Brasil e outros países da América do Sul, além de outras que a época tinham menos relevância como *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (Figura 3B) e *Rhopalosiphum rufiabdominale* (Sasaki, 1899) (BERTELS 1970; BERTELS 1974; FEHN 1970; FEHN 1974; PIMENTA & SMITH 1976). Por sua abundância durante a cultura do trigo e capacidade de transmitir BYDV, *M. dirhodum* foi o principal afídeo vetor de BYDV desse período (CAETANO 1972; CAETANO 1973; CAETANO 1982; BERTELS 1974; FAGUNDES 1971). Em testes de recuperação de BYDV, a partir de amostras de afídeos coletados em diferentes áreas do Rio Grande do Sul, foram transmissores do vírus *M. dirhodum*, *S. avenae*, *R. maidis*, *R. padi* (Linnaeus, 1758) e *S. graminum* (Tabela 2)

(CAETANO 1972). O maior número de amostras infectivas e a maior percentagem de transmissão do vírus foram obtidos para *M. dirhodum*. Dessas espécies, em testes controlados de transmissão, a maior eficiência foi de *M. dirhodum*, *S. avenae* e *R. padi*, sendo mais baixa para *R. maidis* e *S. graminum* (Tabela 3) (CAETANO 1972).

Além dessas espécies, posteriormente, foram demonstradas como vetoras no Brasil, *R. rufiabdominale* e *Sipha flava* (Forbes, 1884), sendo as populações de *R. maidis*, *S. flava* e *R. rufiabdominale* pouco frequentes ou pequenas e, assim, consideradas de baixa importância (CAETANO 1972; CAETANO 1973). Em termos de distribuição das espécies ao longo do ano, Caetano (1972) sintetizou da seguinte forma: *S. graminum* – com ocorrência no outono, principalmente em plantas de aveia, desaparecendo no final do outono (maio) e raramente encontrado na primavera; *R. padi* – ocorrência no outono (abril e maio), desaparecendo ao final dessa estação para reaparecer em menor escala no final de inverno (agosto e setembro); *R. maidis* – rara-

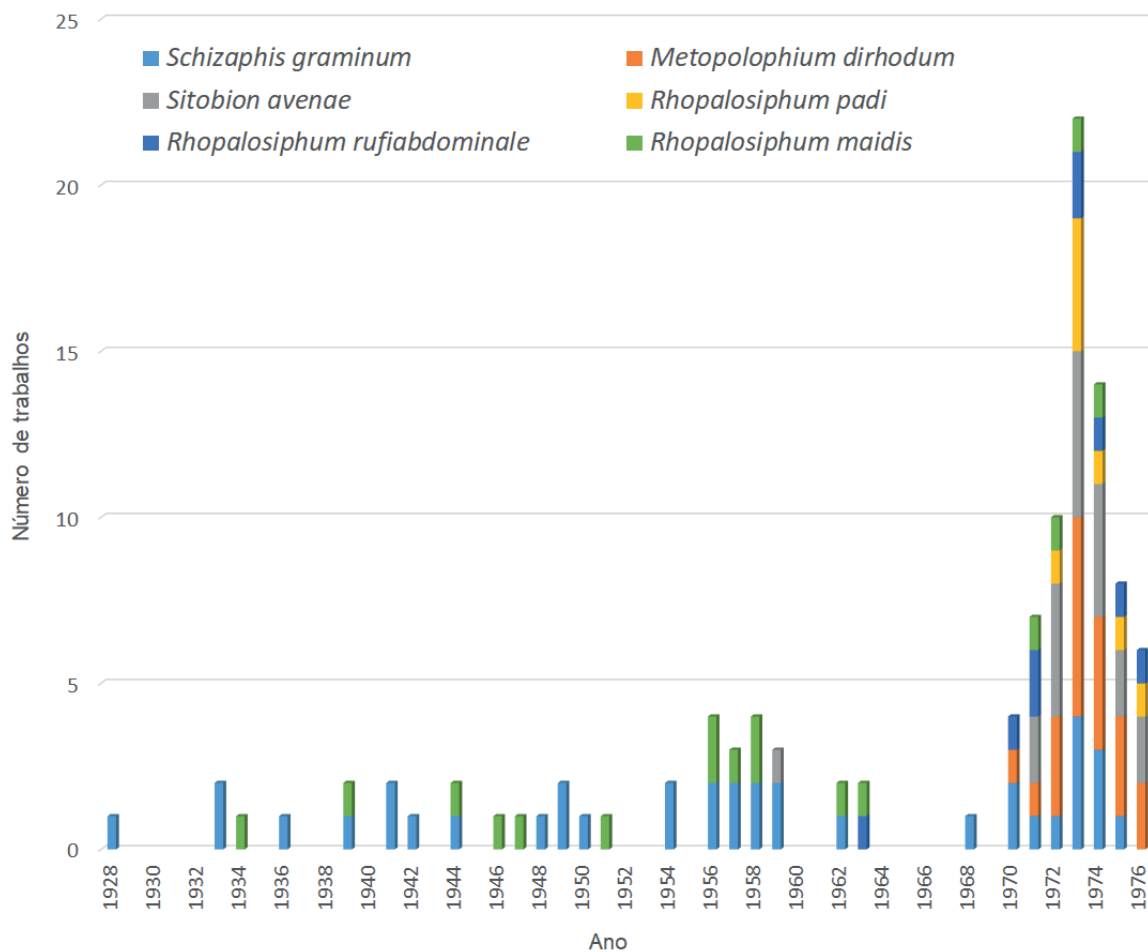


Figura 2. Citações por ano da ocorrência de espécies de afídeos em cereais, principalmente trigo, conforme levantamento realizado por Pimenta & Smith (1976).

Tabela 2. Recuperação de barley yellow dwarf virus a partir de amostras de afídeos coletados em diferentes áreas do Rio Grande do Sul (CAETANO 1972)

Espécie coletada	Ano								
	1969			1970			1971		
	AC	AI	PI	AC	AI	PI	AC	AI	PI
<i>Metopolophium dirhodum</i>	4	4	87	20	16	88	13	11	78
<i>Sitobion avenae</i>	1	1	10	5	4	59	10	7	58
<i>Rhopalosiphum maidis</i>	3	3	21	4	4	17	2	2	12
<i>Rhopalosiphum padi</i>	4	1	40	4	2	35	9	4	39
<i>Schizaphis graminum</i>	2	1	35	4	1	36	3	1	12

AC - Número de amostras coletadas. AI - Número de amostras infectivas. PI - Percentagem média de plantas infectadas com as amostras positivas, usando 10 pulgões por planta.

Tabela 3. Eficiência (%) de transmissão por espécies de afídeos (CAETANO 1972)

Espécie	Experimento		
	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
<i>Metopolophium dirhodum</i>	100	100	100
<i>Sitobion avenae</i>	100	100	100
<i>Rhopalosiphum maidis</i>	48	42	36
<i>Rhopalosiphum padi</i>	100	100	100
<i>Schizaphis graminum</i>	26	34	38

Eficiência de transmissão por espécies de afídeos, determinada pela porcentagem de plantas infectadas sobre um total de 50 plantas inoculadas com 10 insetos por planta, em três experimentos (CAETANO 1972).

mente encontrado em trigo, sendo mais comum em cevada, sorgo e, por vezes, milho. *M. dirhodum* – espécie mais comum em trigo a partir de agosto, com populações muito elevadas (mais 90 % dos afídeos encontrados em trigo); *S. avenae* – ocorrência em trigo a partir de agosto e com populações elevadas na época do espigamento. Assim, *R. padi*, embora com distribuição mais ampla, raramente era encontrado como praga severa nos cultivos de cereais de inverno. *S. avenae* e *S. graminum* estavam presentes em infestações baixas entre 1967 e 1970, com aumento entre 1971 e 1972. Apesar de *S. graminum* ser relatado como vetor de baixa eficiência, era considerado importante devido a sua capacidade migratória, e também pela toxidez da saliva que causa manchas cloróticas e necróticas onde se alimenta. *S. graminum* era considerado um pulgão importante para plantios antecipados (outono) nos anos 1970.

Colônias de *M. dirhodum* ocorriam em trigo, aveia, cevada e gramíneas espontâneas. A eficiência de transmissão por indivíduos adultos ápteros era crescente em função do tempo de alimentação na planta infectada (período para aquisição) e do tempo de alimentação na planta inoculada (período

para transmissão), aproximando-se de 100 % quando estes períodos eram de 72 h (Figura 4) (CAETANO 1972). Como as populações de *M. dirhodum* eram tolerantes a baixas temperaturas, com picos de colonização ocorrendo na metade do inverno e início da primavera, nesse período de infecção generalizada no campo, as populações eram compostas por uma média de 80 % de indivíduos virulíferos (CAETANO 1972). Na época, em sua maioria, as cultivares comerciais de trigo utilizadas na Região Sul eram boas hospedeiras para *M. dirhodum*, além disso as condições de temperatura e umidade da região favoreciam o rápido desenvolvimento das populações. Estes fatores podem ter contribuído para a ocorrência das altas populações de *M. dirhodum* descritas na época (CAETANO 1973).

Quanto ao vírus, na época se descrevia que ocorria na forma de estirpes, diferenciadas pela eficiência com que podiam ser transmitidas pelas diferentes espécies de afídeos vetores. No Sul do Brasil, as estirpes eficientemente transmitidas por *M. dirhodum* e *S. avenae* eram dominantes. Tinham como características produzir sintomas fracos em trigo, mesmo assim provocavam acentuada queda

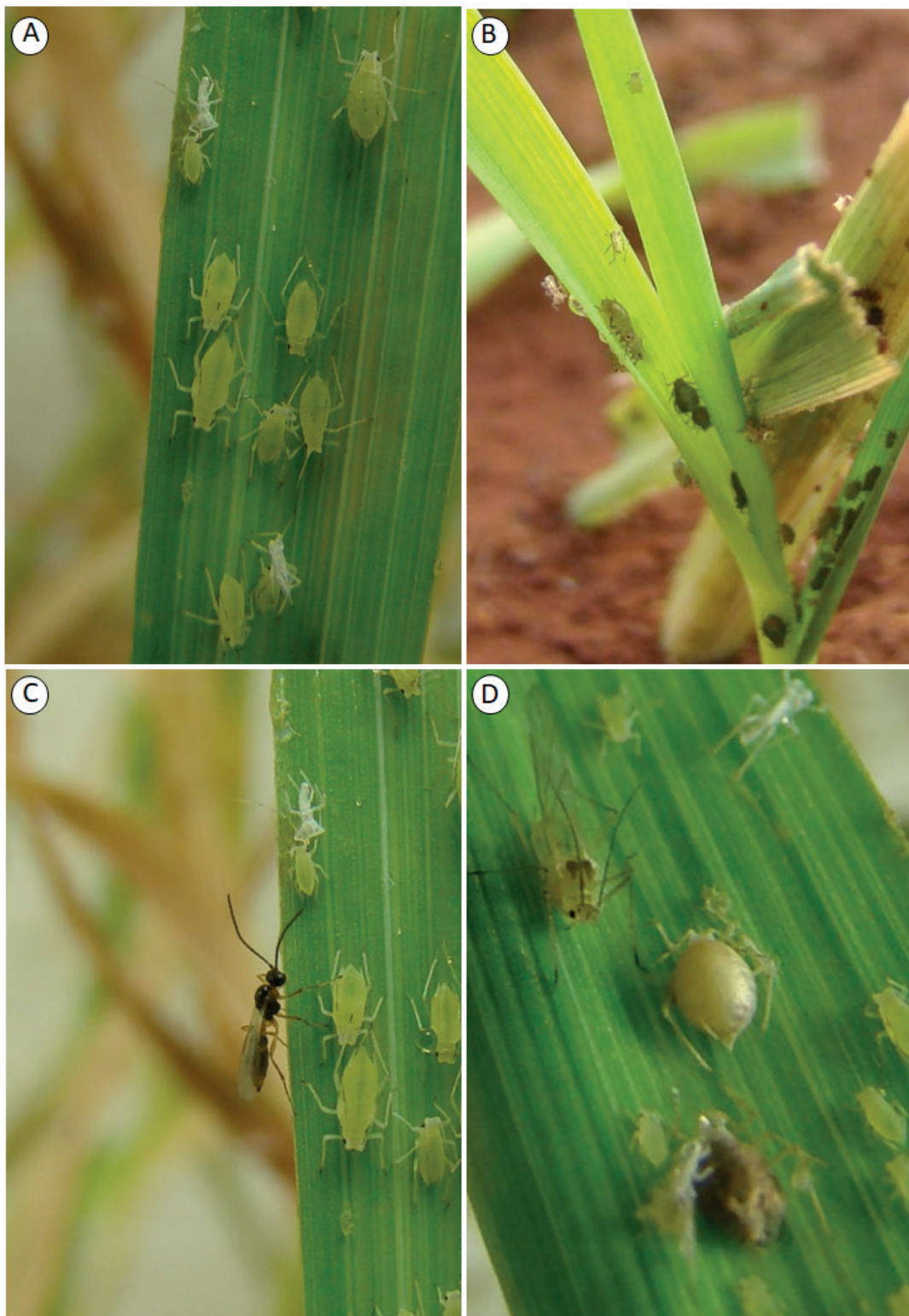


Figura 3. Pulgões vetores de barley yellow dwarf virus (BYDV) e inimigos naturais. A) Colônia de *Metopolophium dirhodum*. B) Colônia de *Rhopalosiphum padi*. C) Vespinha parasitoide. D) Pulgão mumificado após ser parasitado. (Fotos Douglas Lau).

na produção (CAETANO 1982). Também havia estirpes transmitidas de maneira específica por *M. dirhodum*, *S. avenae*, *R. padi* e *S. graminum*, sendo observado comportamento diferencial de cultivares para estirpes, embora com pequena frequência (CAETANO 1982).

Outra forma de analisar a história do BYDV no Brasil é considerar as modificações que ocorreram na composição da paisagem agrícola e implementação de medidas de manejo ao longo do tempo e seus efeitos sobre os componentes do patossistema (plantas hospedeiras, afídeos vetores e vírus). Quan-

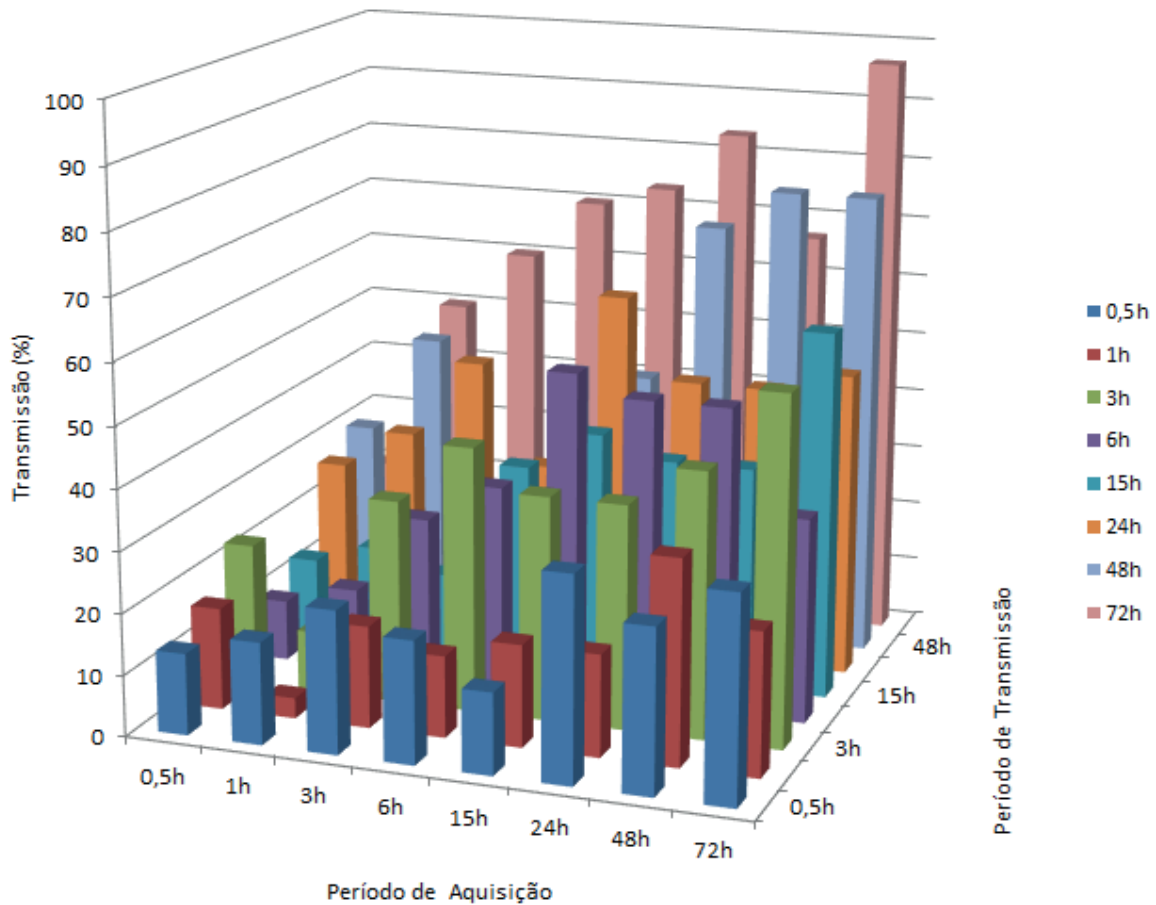


Figura 4. Relação entre período de aquisição, transmissão e eficiência de transmissão de barley yellow dwarf virus. Determinações obtidas para *Metopolophium dirhodum* em trigo cultivar Lagoa Vermelha, inoculação utilizando um afídeo por planta no estágio de uma folha (CAETANO 1972).

do o agente etiológico foi oficialmente relatado em 1968, a agricultura brasileira passava por modificações tecnológicas significativas (CAETANO 1968; CAETANO 1972; CAETANO 1973). Na década de 60, houve uma excepcional expansão da área de cultivo de trigo na Região Sul do Brasil. A disponibilidade de plantas hospedeiras e a baixa eficiência dos inimigos naturais nativos a pragas introduzidas resultaram em alta densidade populacional de afídeos vetores, e BYDV se tornou um grave problema da triticultura nos anos 1970. Em 1972, a doença já estava presente de forma generalizada em toda a área de 2 milhões hectares de produção de trigo da região. Entre 1967 e 1972, foram estimados danos causados pela virose entre 20 e 30 % à produção brasileira de trigo (CAETANO 1972).

Na década de 70, os pulgões já eram considerados a principal praga da cultura do trigo. Com a expansão do cultivo de trigo, acompanhada pela invasão de afídeos nativos da Europa e da Ásia, em um novo ambiente, na ausência de inimigos natu-

rais eficientes, as populações atingiram níveis de praga (BERTELS 1970; TAMBASCO 1984; GASSEN 1984; SALVADORI & SALLES 2002).

Entre os principais inimigos naturais de pulgões estão insetos predadores (como dípteros da família Syrphidae, coleópteros da família Coccinellidae e neurópteros da família Chrysopidae) e parasitoides (microhimenópteros das famílias Aphididae e Aphelinidae) (Figura 3C) (GASSEN 1986). Esses últimos, são vespas pequenas que ovipositam no interior do corpo afídeo. Ao eclodir, as larvas das vespas se alimentam dos tecidos do afídeo matando-o, restando apenas o exoesqueleto do hospedeiro que é denominado de múmia (Figura 3D). As espécies de parasitoides de afídeos que ocorriam naturalmente na Região Sul do Brasil até os anos 1970 eram *Aphidius colemani* (Viereck, 1912), *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) e *Diaeretiella rapae* (M'Intosh, 1855); também eram relatados sirfídeos como *Allograpta exotica* (Wiedemann, 1830) e *Pseudodoros clavatus* (Fabricius, 1794); coccinelídeos como Cy-

cloneda sanguinea (Linnaeus, 1763) e *Eriopsis connexa* (Germar, 1824); e entomopatógenos (BERTELS 1970; GASSEN & TAMBASCO 1983; SILVA et al. 1968; REINIGER 1941; PIMENTA & SMITH 1976; GRAVENA 1979; LÁZZARI 1985; STARÝ et al. 2007). Mas o controle biológico exercido por esses inimigos naturais sobre as populações de afídeos era considerado ineficiente (PIMENTA & SMITH 1976; SALVADORI et al. 2006). Assim, o manejo de afídeos era feito principalmente por inseticidas químicos e, devido às grandes populações de afídeos, de forma generalizada. Há relatos de que eram necessárias de duas até cinco aplicações de inseticidas ao longo do ciclo do trigo (GASSEN 1984; CAETANO 1973; ZÚÑIGA-SALINAS 1982; KOBER 1972; PIMENTA & SMITH 1976; AMBROSI 1987; ROSA 1988).

No final dos anos 1970, foi iniciado o programa de controle biológico dos pulgões do trigo no Brasil. No período de 1978 a 1992, foram introduzidas algumas espécies de parasitoides (GASSEN & TAMBASCO 1983; ZÚÑIGA-SALINAS 1982; SALVADORI & SALLES 2002; SALVADORI & TONET 2001). Também foi desenvolvido um trabalho de conscientização de técnicos e agricultores para a adoção do manejo integrado de afídeos com base na racionalização do uso de inseticidas para favorecer o controle biológico através dos inimigos naturais que já existiam no ambiente e os introduzidos (SALVADORI et al. 2006).

As espécies *Aphidius rhopalosiphi* (De Stefani-Perez, 1902), *Aphidius uzbekistanicus* (Luzhetzki, 1960) e *Praon volucre* (Haliday, 1833) tiveram sucesso na adaptação (GOMEZ & RUMIATTO 1989; MACHADO & DOS SANTOS 2013; LÁZZARI, 1985; ZANINI et al. 2006a, b; ALVES et al. 2005; BORTOLOTTO et al. 2012; RONQUIM et al. 2004; GASSEN 1999; GASSEN & TAMBASCO 1983; ZÚÑIGA-SALINAS 1982; SALVADORI & TONET 2001; STARÝ et al. 2007; SANTOS 2020). O programa de controle biológico excedeu a meta de atingir de 10 a 15 % de parasitismo, levando a redução de 95 % nas aplicações de inseticidas para controle de pulgões em trigo (TAMBASCO 1984; GASSEN 1999; GASSEN & TAMBASCO 1983; ZÚÑIGA-SALINAS 1982; SALVADORI & TONET 2001; SALVADORI et al. 2006).

Além da introdução do controle biológico, a partir de 1972 os produtores brasileiros passaram a aderir gradualmente ao plantio direto. Em 2005, mais de 23,6 milhões de hectares, cerca de 60 % da área cultivada brasileira, já eram cultivados em sistema de plantio direto (MELLO & VAN RAIJ 2006).

A adoção do sistema modificou a paisagem agrícola brasileira, e levou a introdução de novas espécies cultivadas para adaptar a rotação de cultura. A partir de 1980, o cultivo da aveia aumentou significativamente. O cultivo de aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), utilizada para cobertura de solo e produção de forragem após a colheita das culturas de verão (soja e milho), nos meses de março e maio passou a ser intensamente utilizado (FLOSS et al. 2007; FLOSS 1988). Com o avanço do melhoramento, a aveia branca (*Avena sativa* L.) também foi introduzida visando a produção de grãos. A área média colhida de aveia para grão no Brasil passou de 58,4 mil hectares no final da década de 1970 para 242,0 mil hectares na década de 2000, um acréscimo de 314,4 %. Estima-se que a área destinada a aveia preta para cobertura de solo e produção de forragem seja dez vezes a área de cultivo de aveia grão, provavelmente mais de 2,0 milhões de hectares (DE MORI et al. 2012). A introdução do programa de controle biológico em conjunto com a adoção do sistema de plantio direto e a expansão das áreas de aveia modificaram a densidade e composição das populações de afídeos vetores. As populações de *M. dirhodum*, que eram muito elevadas na década de 70, declinaram significativamente (CAETANO 1973; GASSEN 1988; SALVADORI et al. 2006; SALVADORI & TONET 2001). Como não se tem conhecimento das espécies virais presentes no período pré-controle-biológico, não é possível inferir sobre as modificações na variabilidade da população viral.

FASE SOROLÓGICA

A fase sorológica ocorreu durante os anos 1990 e parte da primeira década dos anos 2000. Essa fase é marcada pela introdução de testes sorológicos para diagnóstico, estudos epidemiológicos e de reação das plantas aos vírus. Esses estudos foram realizados utilizando testes sorológicos que passaram a ser disponibilizados por companhias de países do hemisfério norte.

Os levantamentos a campo apontavam que BYDV-PAV (Padi avenae virus) era prevalente na Região Sul do Brasil, e BYDV-SGV (Schizaphis graminum virus), BYDV-MAV (Macrosiphum avenae virus) e cereal yellow dwarf virus (CYDV-RPV) (Rhopalosiphum padi virus) ocorriam em menor proporção (SCHONS & DALBOSCO 1999; BIANCHIN 2008; LANZARINI 2007; PARIZOTO 2013; LAU et al. 2009). Em 1998, 75 % das plantas de trigo e aveia coleta-

das nos estados do Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso do Sul estavam infectadas com BYDV-PAV, 20 % das plantas estavam infectadas com BYDV-MAV e 5 % com BYDV-SGV (SCHONS & DALBOSCO 1999). Em 2006, de 130 amostras de plantas de trigo coletadas em 18 municípios dos estados de Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul e avaliadas por DAS-ELISA com anti-soros monoclonais para BYDV-PAV, BYDV-MAV e CYDV-RPV, BYDV-PAV foi prevalente, presente em 75 % das amostras, seguida por CYDV-RPV em 12,5 % das amostras, e outras 12,5 % das amostras apresentaram infecção mista de BYDV-PAV e CYDV-RPV (BIANCHIN 2008).

Os estudos desse período também permitiam inferir mais detalhadamente sobre a relação afídeo-vírus. Curiosamente, já se percebia uma modificação das espécies de afídeos preponderantes na Região Sul do Brasil em cereais de inverno. No final dos anos 80 e anos 90, *S. graminum* era novamente considerada uma das principais espécies-praga do trigo pelos danos diretos que causava (GASSEN 1988; SALVADORI & TONET 2001), o que motivou a introdução da resistência a biótipos desse afídeo em cultivares de trigo (TONET et al. 1994; TONET & SILVA 1995a, b). Também a partir dos anos 1990, observou-se um aumento na população de *R. padi*, espécie de pulgão até então pouco relevante na Região Sul do Brasil (SALVADORI & TONET 2001; SILVA et al. 2004; ROZA-GOMES et al. 2008; LAU et al. 2009). Em levantamento de espécies de afídeos por meio de armadilhas amarelas (Moericke) presentes durante o cultivo de aveia preta e trigo nos anos de 2008, 2009 e 2010, no município de Coxilha, Rio Grande do Sul foram encontrados *R. padi* (57,6 %), *S. avenae* (31,0 %), *S. graminum* (7,7 %), *M. dirhodum* (1,4 %), *R. rufiabdominalis* (0,9 %), *R. maidis* (0,6 %), *S. maydis* (0,4 %) e *S. flava* (0,4 %) (REBONATTO et al. 2015). Em levantamentos realizados diretamente sobre plantas ao longo de todo o ano, houve variação na frequência de ocorrência desses afídeos: *R. padi* ocorreu em maior frequência e com populações estáveis ao longo do ano; no verão, *S. graminum* e *R. padi* foram predominantes no milho e em plantas de trigo e aveia voluntárias que ocorrem em lavouras de soja, e em áreas não cultivadas; as mesmas espécies foram predominantes no outono em aveia; no inverno, *S. avenae* predominou em lavouras de trigo e aveia, e *S. graminum* e *R. padi* também ocorreram; outras espécies encontradas

em menor proporção no período do inverno e início de primavera foram *M. dirhodum* e *Sipha maydis* (Passerini, 1860) (LAU et al. 2009). Esta última é a espécie de afídeo de cereais mais recentemente descrita no Brasil, sendo relatada nas Américas a partir dos anos 2000 (PEREIRA et al. 2009).

Atualmente, *R. padi* tem sido frequente e em níveis populacionais que não costumam causar danos diretos significativos, mas são suficientes para atingir níveis de transmissão do vírus que causam impacto econômico na cultura do trigo e outros cereais de inverno (BILIBIO et al. 2021; LAU et al. 2011; 2020b; 2021b). O vírus eficientemente transmitido por esse afídeo, BYDV-PAV, é prevalentemente encontrado por testes sorológicos e moleculares (PARIZOTO 2011; PARIZOTO et al. 2013; MAR et al. 2013). Assim, *R. padi* passou a ser considerado o principal vetor de BYDV no Brasil devido a ocorrência frequente e a eficiência de transmissão (EF). Entre 2008 e 2009, foi realizado um monitoramento da flutuação das populações virais e de afídeos vetores presentes em campo em Coxilha no norte do Rio Grande do Sul, por meio de coletas semanais em parcelas de milho (verão), trigo e aveia (inverno). Do total de afídeos, 12,7 % eram virulíferos, sendo que *R. padi* foi predominante (92,5 %) e *S. avenae* também foi detectado em menor proporção (7,5 %). Em ensaios de transmissão, *R. padi* transmitiu principalmente BYDV-PAV (95,4 %), e também CYDV-RPV (2,3 %) e BYDV-MAV em infecção mista com BYDV-PAV (2,3 %), enquanto que *S. avenae* transmitiu apenas BYDV-PAV. BYDV-PAV também foi predominantemente detectado em plantas de aveia e trigo, sendo que 65,8 % das plantas estavam infectadas com BYDV-PAV e, em 0,7 % das plantas de aveia, BYDV-PAV foi encontrado em infecções mistas com BYDV-MAV. Em testes de eficiência de transmissão, *R. padi* foi o vetor mais eficiente (EF=94,4 %), seguido de *S. avenae* (EF=76,1 %), e *M. dirhodum* (EF=63,4 %) (PARIZOTO 2011; PARIZOTO et al. 2013).

FASE MOLECULAR

A fase molecular iniciou no final da primeira década dos anos 2000 e segue até os dias de hoje. Essa fase é marcada pelo uso de métodos moleculares como RT-PCR e sequenciamento que complementam os estudos epidemiológicos e de transmissão. A detecção molecular realizada pela amplificação e sequenciamento da capa proteica

(CP) viral utilizando os oligonucleotídeos descritos por Malmstrom & Shu (2004) suportou a prevalência de BYDV-PAV na Região Sul do Brasil (MAR et al. 2013). Essa prevalência, também é descrita em outras regiões do mundo, nas quais BYDV-PAV tornou-se dominante, sendo muito competitiva (ARADOTTIR & CRESPO-HERRERA 2021; HALL & LITTLE 2013; LIU et al. 2020; NAJAR et al. 2017; PARRY et al. 2012; STEMPKOWSKI et al. 2022), com exceções como República Tcheca e Alasca, onde métodos de diagnóstico moleculares indicam BYDV-PAS como a espécie de ocorrência mais frequente (JAROŠOVÁ et al. 2013; ROBERTSON & FRENCH 2007). A prevalência de BYDV-PAV tem sido relacionada ao fato de ser eficientemente transmitida por *R. padi* uma espécie cosmopolita e de ampla adaptabilidade (ARADOTTIR & CRESPO-HERRERA 2021; PARIZOTO et al. 2013). Curiosamente, esta parece ser uma via de mão dupla, pois a presença de BYDV-PAV em *R. padi* aumenta sua tolerância térmica permitindo que os pulgões ocupem regiões mais altas e mais quentes de plantas hospedeiras infectadas quando deslocadas de regiões mais frias por competição com outra espécie (*R. maidis*), levando a uma expansão do nicho do afídeo vetor (PORRAS et al. 2020).

Por RT-PCR e sequenciamento também foi detectada a presença de maize yellow dwarf virus (MYDV-RMV) em amostras de aveia coletadas no Rio Grande do Sul (MAR et al. 2013). No entanto, a presença de BYDV-MAV, BYDV-SGV e CYDV-RPV, detectados na fase sorológica, não foi confirmada por métodos moleculares até o momento (MAR et al. 2013; SCHONS & DALBOSCO 1999; BIANCHIN 2008; PARIZOTO et al. 2013). Posteriormente, em 2013, MYDV-RMV foi detectado via NGS (*Next-Generation Sequencing*) infectando milho no estado de São Paulo (GONÇALVES et al. 2017).

Recentemente, os genomas de dois isolados brasileiros de BYDV foram sequenciados e caracterizados por este grupo de pesquisa. Um genoma de RNA de fita simples de sentido positivo com 5.658 nts foi obtido para um isolado de trigo (código de acesso no GenBank MT345894) e outro de 5.655 nucleotídeos para um isolado de aveia (MT345895). O sequenciamento completo do genoma confirmou as análises sorológicas e moleculares anteriores (PARIZOTO et al. 2013; MAR et al. 2013) de que os isolados de vírus pertencem à espécie *Barley yellow dwarf virus-PAV* (Figura 5).

A região 5'-terminal não codificadora (UTR)

(1–129) do isolado de trigo contém um nucleotídeo a mais (C na posição 1) do que a região não codificadora do isolado de aveia. Seis *open reading frames* (ORFs) foram identificadas: ORF1 (130–1149) que parcialmente se sobrepõe a ORF2 (130–2732); ORF3a (2722–2865); ORF3 (2846–3448); que contém a ORF 4 (2889–3350); ORF5 (2846–4798) e; ORF6 (4905–5033) (Figura 5A). A região 3'-terminal não codificadora (5034–5658) do isolado de trigo contém dois nucleotídeos (AA) a mais que a região 3' UTR do isolado de aveia. Essa organização do genoma é compatível com o gênero *Luteovirus* (MILLER & RASOCHOVÁ 1997). As ORF1-2 são traduzidas a partir de RNA genômico por *ribosomal frameshifting* (-1) e codificam as proteínas P1-P2 fundidas com função de replicação do RNA (RdRp). As ORFs 3a, 3, 4 e 5 são traduzidas a partir de RNA subgenômico (sgRNA1). A tradução da ORF3a depende de uma inicialização em códon não AUG. A tradução das ORFs 3 e 4 é dependente de *leaky scanning*. A ORF5 é traduzida via *in frame readthrough* do stop códon da ORF3 formando um domínio fundido a CP (CP-RTD). Quanto a função, a ORF 3 codifica a capa proteica (CP), a ORF 4 a proteína de movimento célula-a-célula via plasmodesmas (MP) e a ORF5 (CP-RTD) é necessária para a transmissão por afídeos e movimento sistêmico na planta. A ORF6 é traduzida de um RNA subgenômico (sgRNA2) e codifica a P6 que pode funcionar como supressora de silenciamento de RNA (LIU et al. 2012; SMIRNOVA et al. 2015; LEFKOWITZ et al. 2018).

Os genomas dos isolados de aveia e trigo apresentam alta identidade de nucleotídeos (99,1 %). No total, 49 substituições de nucleotídeos foram mapeadas com distribuição desigual ao longo do genoma. A maior parte da variação genética se concentra na ORF5 na região que codifica o domínio RTD (Figura 5A). Como esperado, sob seleção de purificação operando nas ORFs, em sua maioria as substituições de nucleotídeos mapeadas nas regiões de codificação são sinônimas (dS). Apenas 15 aminoácidos divergentes decorrentes de substituições não sinônimas (dN) foram identificados em uma comparação entre as regiões codificantes de BYDV-PAV de trigo e de aveia. Novamente, a maior parte (11/15) das substituições dN mapeadas está dentro do domínio RTD (Figura 5A). Assim, as proteínas relacionadas à replicação são altamente conservadas entre os isolados virais de aveia e de trigo. A variação genética foi concentrada principalmente dentro

de ORFs que codificam a CP-RTD, particularmente dentro do domínio RTD, que é necessário para a transmissão por afídeos e movimento do vírus.

A sequência de nucleotídeos do genoma completo de BYDV-PAV de trigo e de aveia revela uma identidade de nucleotídeos entre 93,8 % e 95,1 % com isolados da Suécia (número de acesso no GenBank: EF521841), Paquistão (KT252976 e KT252977) e Estônia (MK012661). Assim, quando comparados os genomas completos de isolados de BYDV-PAV da América do Sul, com espécies da extinta família *Luteoviridae* (atualmente agrupadas em *Tombusviridae*) que infectam cultivos de cereais, estes agrupam-se com BYDV-PAV em um clado bem

suportado, corroborando a identificação da espécie (Figura 5B).

Árvores obtidas por inferências Bayesianas com base em sequências de nucleotídeos de proteínas relacionadas à replicação (RdRp, ORF1 + 2) e CP-RTD (ORF3 (4) +5) são incongruentes (Figuras 5C e 5D). A árvore inferida com base na sequência de nucleotídeos de proteínas relacionadas à replicação discrimina entre *Luteovirus* e *Polerovirus* em dois clados bem suportados. BYDV-PAV está intimamente relacionado com BYDV-MAV, assim como na árvore baseada na sequência completa de nucleotídeos do genoma (Figura 5C). No entanto, na árvore inferida com base na sequência de nucleotídeos do CP-RTD,

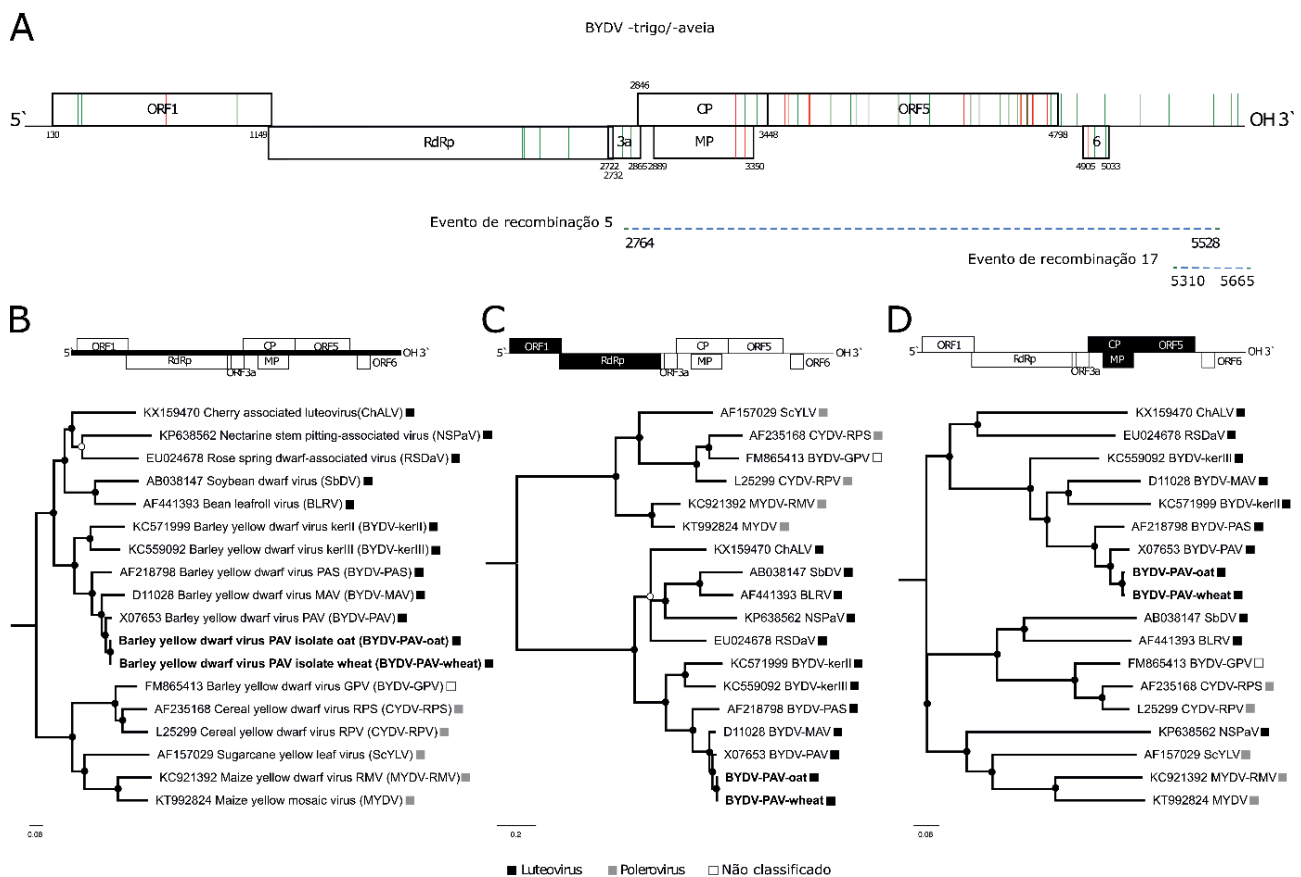


Figura 5. Representação diagramática do genoma de BYDV, comparações e classificação de sequências genômicas de isolados brasileiros de trigo (wheat) e aveia (oat). (A) mapa de substituições e recombinação de nucleotídeos no genoma. As linhas vermelhas indicam substituições de nucleotídeos não sinônimas (dN) e as linhas verdes indicam substituições de nucleotídeos sinônimas (dS). As posições das ORFs são numeradas de acordo com a sequência de referência BYDV-PAV-trigo. As linhas tracejadas azuis indicam os eventos de recombinação 5 e 17 detectados pelo software RDP. (B-D) Árvores de inferência bayesianas enraizadas no ponto médio com base em sequências de nucleotídeos de vírus da extinta família *Luteoviridae*. (B) Genoma completo, (C) proteínas relacionadas à replicação (RdRp, ORF1 + 2) e (D) domínio de leitura da proteína do capsídeo (CP-RTD, ORF3 (4) +5). Uma representação linearizada de cada genoma com região / genes usados para a reconstrução filogenética é indicada em preto. Os nós à direita dos ramos com probabilidades posteriores iguais ou superiores a 0,8 são indicados por círculos cheios e aqueles com valores inferiores a 0,8 e superiores a 0,5 são indicados por círculos vazios. Os isolados brasileiros estão destacados em negrito. As barras de escala indicam substituições de nucleotídeos por posição.

o soybean dwarf virus (SbDV), o bean leafroll virus (BLRV) e o nectarine stem pitting-associated virus (NSPaV) agrupam com as espécies de *Polerovirus*. BYDV-PAV relaciona-se mais com BYDV-PAS (Figura 5D). Em um conjunto de dados compreendendo 114 genomas completos de membros das famílias *Tombusviridae* e *Solemoviridae* (ver Figura 6C para números de acesso), os isolados de BYDV brasileiros são mais semelhantes entre si do que a qualquer outra sequência disponível no banco de dados.

A recombinação desempenha um papel importante na evolução dos luteovirus (BOULILA 2011; PAGAN & HOLMES 2010). Para um conjunto de 112 isolados, 44 eventos de recombinação foram detectados por pelo menos quatro de nove métodos estatísticos usados no RDP4. As sequências brasileiras de BYDV-PAV-aveia e -trigo compartilharam os eventos de recombinação 5 e 17 com outros isolados no conjunto de dados (Figura 5A).

O evento 5 foi comum a 38 isolados de BYDV-PAV e envolveu 2.764 nucleotídeos, abrangendo a região da CP-RTD e ORF6, com um ponto de quebra localizado dentro da ORF3a e o outro na região não codificadora do terminal 3' (Figura 5A). As sequências parentais menores e principais foram identificadas como espécies de BYDV-PAS e espécies provisórias de BYDV-GAV, respectivamente (dados não mostrados). O evento 17 foi comum a 37 isolados de BYDV-PAV e 14 de BYDV-PAS e envolveu 355 nucleotídeos, com ambos os pontos de quebra localizados na região não codificadora do terminal 3' (Figura 5A). As sequências parentais menores e principais foram identificadas como espécies putativas de BYDV-GAV e espécies de BYDV-PAS, respectivamente (dados não mostrados).

Uma vez que mais da metade dos genomas BYDV-PAV-aveia e trigo estavam sob a influência de eventos de recombinação (Figura 5A), não era possível inferir uma árvore usando sequências de nucleotídeos referentes ao genoma completo, excluindo blocos recombinantes do conjunto de dados. As diferenças topológicas entre as árvores com base nas sequências de nucleotídeos dos genes RdRp e CP-RTD suportaram a origem recombinante dos isolados (Figura 7 e 8). A árvore construída por inferência Bayesiana usando sequências de nucleotídeos do genoma completo mostrou dois cladogramas principais (Figura 6); um compreendia sequências agrupadas que compartilhavam uma similaridade com BYDV-PAV-CN (AY855920) (LIU et al. 2007; WU et al. 2011),

e o outro clado compreendia isolados de espécies tentativas de BYDV-OYV (Oat yellow virus) (BISNIEKS et al. 2004), isolados de BYDV-PAS (MAYO 2002), BYDV-PAV (WU et al. 2011), BYDV-MAV (UENG et al. 1992) e isolados BYDV-GAV (JIN et al. 2004).

Dois subgrupos de BYDV-PAV bem suportados foram definidos com base em sequências de nucleotídeos de comprimento total (Figura 6). Um subgrupo compreendeu isolados classificados como PAV-I, de acordo com Wu et al. (2011). O outro subgrupo compreendia isolados que compartilhavam similaridade com BYDV-AUS (X07653) da Austrália (MILLER et al. 1988), BYDV-PAV-048 (EF521840), BYDV-PAV-052 (EF521841), BYDV-PAV-05GG2 (EU332309) e BYDV-PAV-06KM14 (EU332332), que foram anteriormente classificados como PAV-II (WU et al. 2011).

Os dois isolados do Brasil agrupam-se no subgrupo PAV-II, com isolados da Alemanha, Austrália, EUA, Paquistão, Suécia, China e Estônia sendo mais intimamente relacionados com isolados do Paquistão (Figura 6, 7 e 8), exceto para a região CP-RTD, que compartilha uma similaridade mais alta com um isolado sueco (Figura 8). O evento recombinante 5 (Figura 5) é comum a todos os isolados PAV-II, 25/57 isolados PAV-I e isolado PAV-KS (KY593458). Esses isolados possuem uma região RdRp que estava mais intimamente relacionada aos isolados principais de BYDV-GAV (Figura 7), enquanto a região CP-RTD compartilha uma maior similaridade com os isolados de BYDV-PAS de origem secundária (Figura 8).

Os isolados de BYDV de trigo e aveia com genoma sequenciado estão sendo mantidos nesses dois hospedeiros distintos por 12 anos, sofrendo com efeito gargalo devido à passagem pelo afídeo vetor (nesse caso *R. padi*) a cada necessidade de transmissão para novas plantas. Mesmo assim, eles apresentam elevada identidade de nucleotídeos (99,1 %), sendo encontrados apenas 15 aminoácidos divergentes. Ambos os isolados mantiveram a capacidade de infectar tanto o trigo, quanto a aveia. Considerando a paisagem agrícola sul-brasileira, BYDV-PAV deve estar circulando em aveia e trigo. As informações epidemiológicas atuais sugerem que na Região Sul a aveia preta semeada no outono exerce um efeito de multiplicação da população viral e de afídeos vetores, sobretudo BYDV-PAV e *R. padi* (PARIZOTO et al. 2013; ENGEL et al. 2021). Estas populações podem então migrar para o trigo. Quanto maiores as populações de afídeos virulíferos, maior

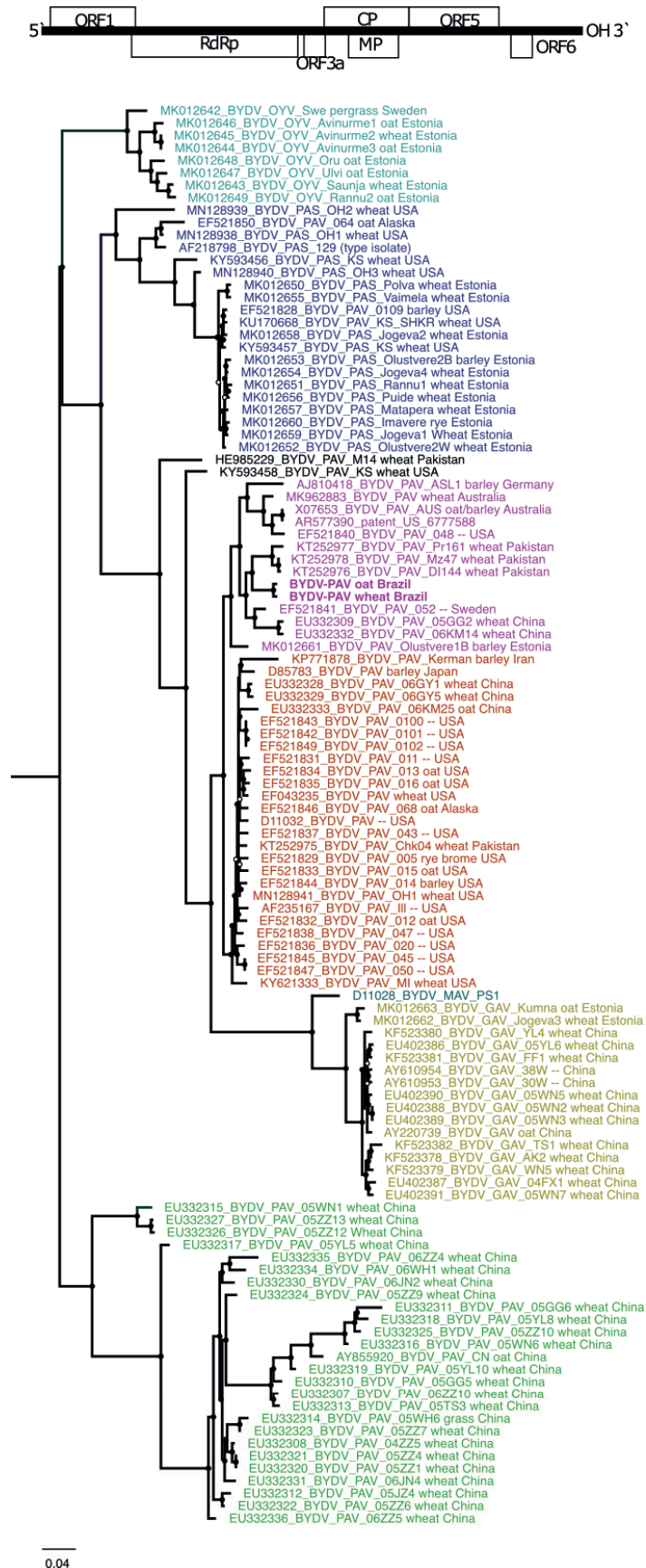


Figura 6. Árvores de inferência bayesianas enraizadas no ponto médio com base em seqüências de nucleotídeos do genoma completo de isolados de espécies da família *Tombusviridae*. Acima da árvore está uma representação linearizada do genoma com região / genes usados para a reconstrução filogenética. Os nós à direita dos ramos com probabilidades posteriores iguais ou superiores a 0,8 são indicados por círculos cheios e aqueles com valores inferiores a 0,8 e superiores a 0,5 são indicados por círculos vazios. Os isolados brasileiros de trigo (wheat) e aveia (oat) estão em negrito. As barras de escala indicam substituições de nucleotídeos por posição.

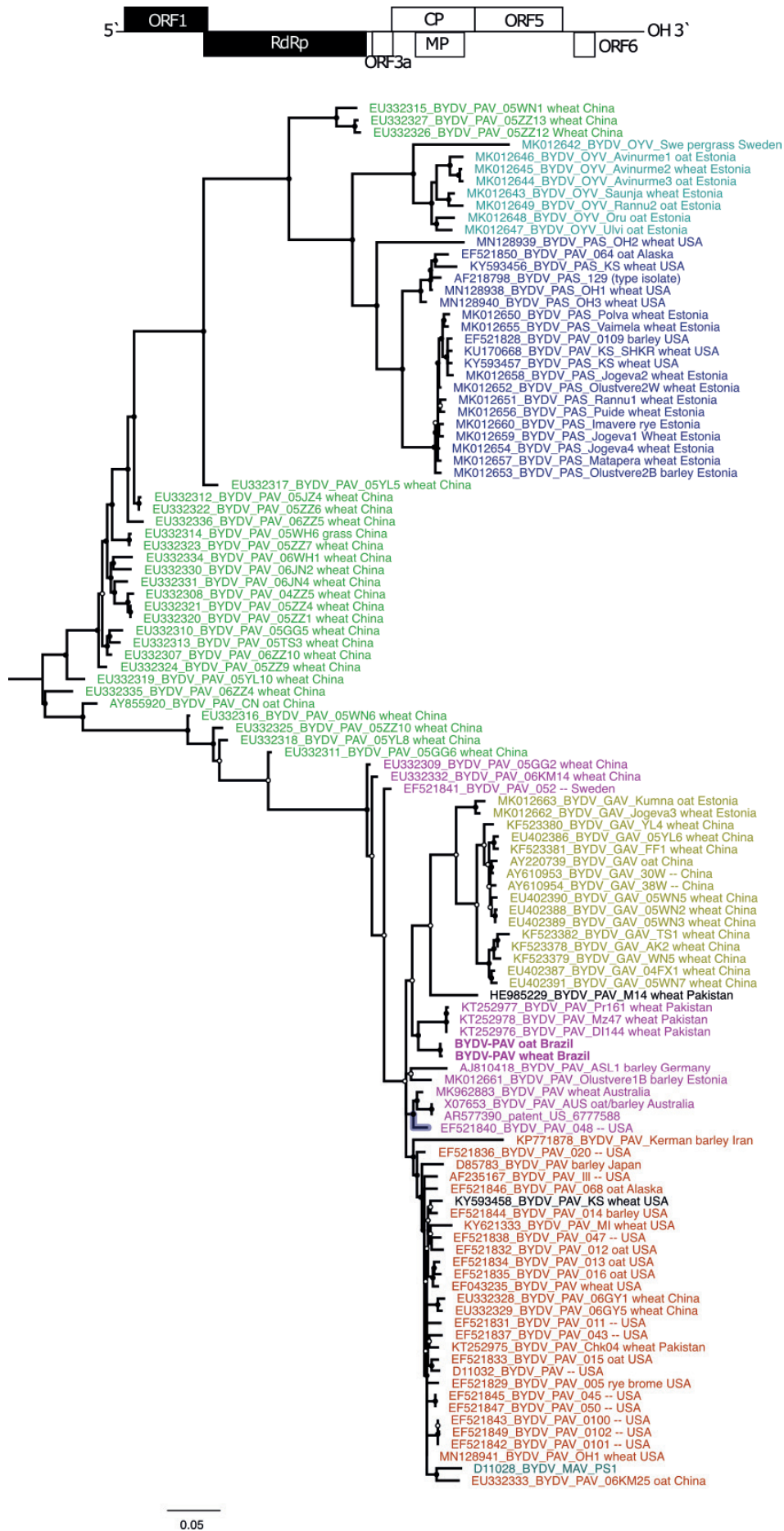


Figura 7. Árvores de inferência bayesianas entre isolados de espécies da família *Tombusviridae*, com base em sequências de nucleotídeos das ORFs que codificam as proteínas relacionadas à replicação (RdRp, ORF1 + 2). Detalhes da árvore conforme descrito na legenda da Figura 6.

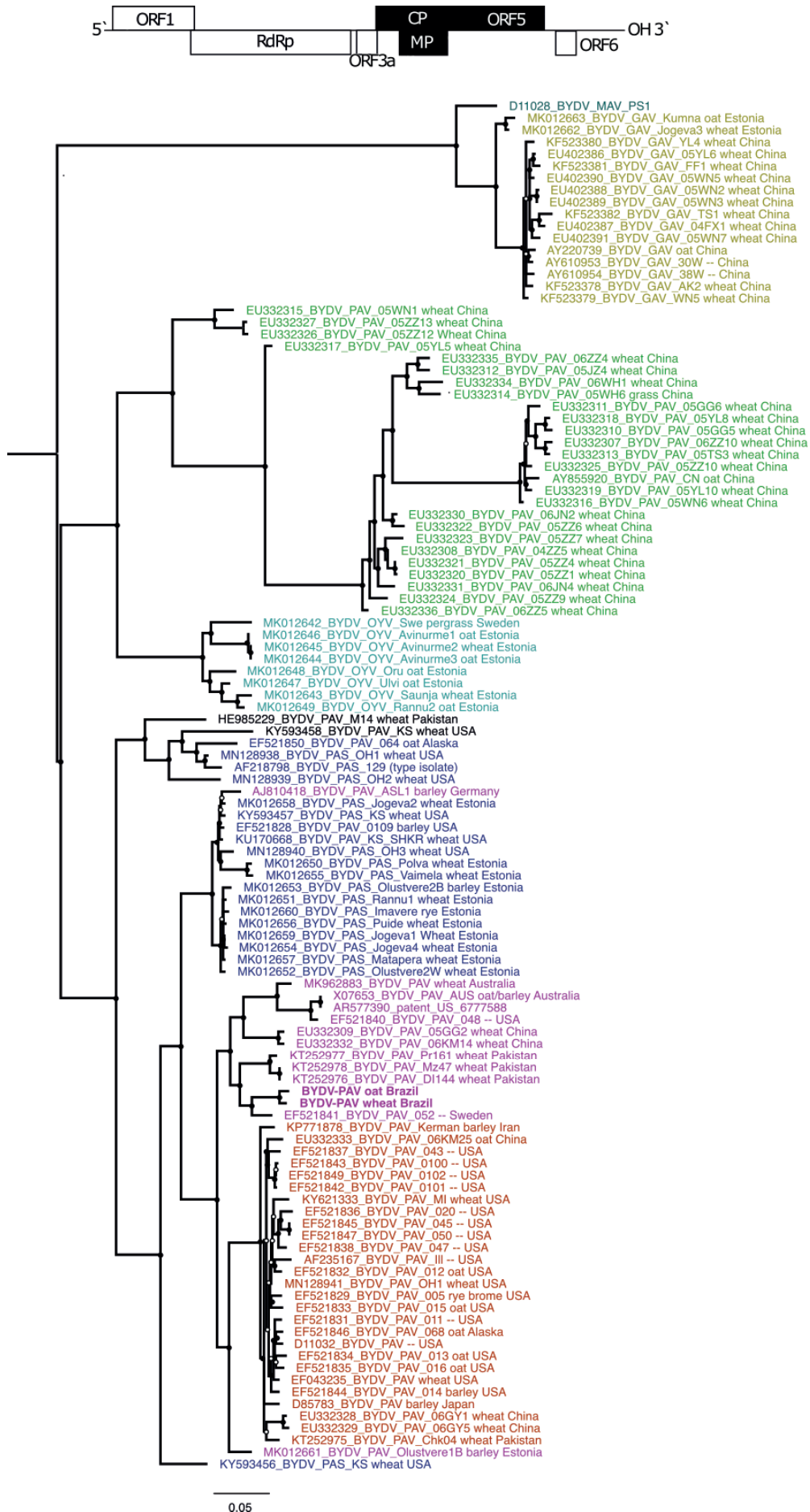


Figura 8. Árvores de inferência bayesianas entre isolados de espécies da família *Tombusviridae* com base em sequências de nucleotídeos das ORFs que codificam as proteínas do capsídeo e movimento (CP-RTD, ORF3 (4) +5). Detalhes da árvore conforme descrito na legenda da Figura 6.

tendem a ser a incidência da virose e os danos à cultura (PEREIRA et al. 2016; BILIBIO et al. 2021). Os danos também dependem do momento da infecção e resistência/tolerância da cultivar (CEZARE et al. 2011). Após o ciclo da cultura do trigo, os afídeos e o vírus necessitam manter-se em plantas voluntárias de cereais de inverno, gramíneas daninhas ou em gramíneas cultivadas. Fato é que afídeo e vírus têm suas populações reduzidas e voltam a ser detectados em maior quantidade no final do verão e início do novo outono com o aumento das áreas de aveia (PARIZOTO et al. 2013; ENGEL et al. 2021). Recentemente, Van den Eynde et al. (2020) apresentaram uma revisão descrevendo os determinantes espaço-temporais da epidemiologia de BYDV considerando as informações de estudos desenvolvidos em regiões temperadas. Esses autores oferecem uma visão sobre a importância da estrutura e da composição da paisagem agrícola na epidemiologia. Os dados que vem sendo obtidos na região subtropical do Brasil representam um paralelo as tradicionais regiões produtoras de cereais de clima temperado, cobrindo lacunas de conhecimento como, por exemplo, o papel das culturas de cobertura (como a aveia preta). De fato, a hipótese levantada por esses autores de que tais culturas semeadas no final do verão, antes das culturas de inverno de maior valor econômico, podem representar excelentes hospedeiros nessa janela temporal, é corroborada pela série de dados da região Sul do Brasil. Tais culturas não apenas mantêm as populações de afídeos e do vírus, mas têm papel decisivo em sua multiplicação.

O momento da introdução do BYDV no Brasil e se novas introduções ocorreram também permanece desconhecido. O papel de outros hospedeiros (por exemplo, gramíneas nativas) na epidemiologia e geração de variabilidade de BYDV no Brasil e países adjacentes requer elucidação.

DANOS, RESISTÊNCIA E TOLERÂNCIA EM GENÓTIPOS BRASILEIROS DE TRIGO

No Brasil, os primeiros estudos visando conhecer a reação de variedades de trigo em relação ao BYDV foram realizados por Vanderlei da Rosa Caetano que também estimou os danos provocados pela doença nas condições brasileiras (CAETANO 1972). As inoculações do vírus eram realizadas com afídeos (*M. dirhodum*) virulíferos, em plantas no estágio de duas folhas. Após 15 dias da inoculação, o material era transplantado em campo, sendo que plantas

não inoculadas submetidas aos mesmos procedimentos eram utilizadas como referência para comparação de desenvolvimento. Notas visuais eram atribuídas visando estimar o percentual de redução no desenvolvimento. Caetano fez uma distinção entre resistência e tolerância. Como algumas variedades apresentavam 100 % de plantas com sintomas, enquanto que outras apresentavam um percentual de escape, esse autor considerou suscetíveis variedades com percentual de infecção superior a 70 %, moderadamente resistentes aquelas que tiveram uma infecção entre 40 e 70 % e resistentes aquelas com infecção abaixo de 40 %. Por outro lado, a tolerância foi avaliada com base na redução da massa vegetativa: intolerantes, redução igual ou superior a 80 %; moderada tolerância, com reduções entre 40-80 % e tolerantes, com redução inferior a 40 %. Seguindo estes critérios, mais de 85 % dos genótipos de trigo avaliados na época eram suscetíveis e intolerantes a virose com redução de produtividade acima de 80 % e cerca de 11 % dos genótipos avaliados apresentavam de moderada tolerância a tolerância (Figura 9) (CAETANO 1972). Entre estes, IAC 5 Maringá (moderadamente tolerante) e Pel 14410-64 Londrina (tolerante), foram utilizados como fontes de tolerância em programas de melhoramento de novas cultivares de trigo. Entre os descendentes destes genótipos, destaca-se BR 35 (IAC5*2/3/CNT7*3/Londrina//IAC5/Hadden), lançado em 1989, apontado como um genótipo a ser utilizado como genitor em programas de melhoramento de trigo que visem à obtenção de combinações genéticas com tolerância ao BYDV (BARBIERI et al. 2001).

A tolerância parece ser uma característica predominante na relação trigo-BYDV. Estudos determinando a presença do vírus na planta sugerem que, em geral, as cultivares brasileiras são suscetíveis (soropositivas), porém absorvências mais baixas em ELISA foram consistentemente detectadas em cultivares que apresentam maior severidade de sintomas (como por exemplo Rubi, Embrapa 16 e Kenya 58). Entre os genótipos que apresentaram títulos virais mais elevados estão todos aqueles que apresentaram sintomas e danos menos severos (IAC5 Maringá, BRS Timbaúva e BR 35). Estes dados sugerem que a tolerância foi a principal característica selecionada para conviver com o nanismo amarelo no Brasil. O mais baixo título encontrado nas cultivares que exibem sintomas mais severos pode ser decorrente de danos fisiológicos oriundos da in-

fecção viral que afetam não apenas a planta, mas também o próprio processo infeccioso. Estas relações também foram descritas por Comeau & Haber (2002). Como apontado por esses autores, em trigo, a suscetibilidade *sensu stricto* (refletida em altos títulos de ELISA) não está relacionada a uma maior probabilidade de danos graves. Assim, embora a resistência *sensu stricto* (expressa em títulos de ELISA reduzidos) resulte em uma disseminação reduzida do vírus no campo, não necessariamente conduzirá a danos menores em plantas individualmente infectadas.

Analisando mecanismos que podem estar associados à redução de danos em genótipos brasileiros de trigo, Cezare et al (2011) verificaram que BRS Timbaúva é uma cultivar que apresenta, em comparação às cultivares recentemente recomendadas para plantio, menores reduções de produtividade em ensaios que avaliam os danos causados por BYDV. Os mecanismos que levam a este comportamento podem estar associados ao vetor (o que compromete a transmissão/disseminação do vírus), bem como ao vírus. Evidências quanto à resistência de BRS Timbaúva a afídeos foram obtidas por Peruzzo et al. (2007) e Savaris et al. (2013). BRS Timbaúva

exerce efeito adverso sobre *R. padi*. A permanência de *R. padi* sobre BRS Timbaúva é menor em relação a cultivares mais suscetíveis, assim como o afídeo se reproduz em menores taxas sobre essa cultivar. Em relação ao vírus, BRS Timbaúva é suscetível à infecção viral. As curvas de absorvância em função do tempo para esta cultivar são similares em forma e magnitude às curvas de Embrapa 16 (cultivar suscetível e intolerante). Embora não significativas, existem pequenas diferenças no padrão de curva com leve atraso em BRS Timbaúva, que pode estar associado ao efeito da planta sobre o vetor dificultando a transmissão do vírus. Também ocorre um menor percentual de plantas soropositivas em testes com número variável de afídeos, sendo possível que em baixo número de afídeos, a resistência ao vetor seja suficiente para diminuir a probabilidade de transmissão do vírus. BRS Timbaúva tem sido utilizada como testemunha em ensaios de avaliação da reação de cultivares. Nesses ensaios, é utilizada uma quantidade de inóculo elevada para garantir a inoculação do vírus (10 pulgões por plantas, plantas no estágio de duas folhas). Ao longo de 10 anos a classificação indicativa dessa cultivar manteve-se, pelos critérios atuais, como moderadamente tolerante

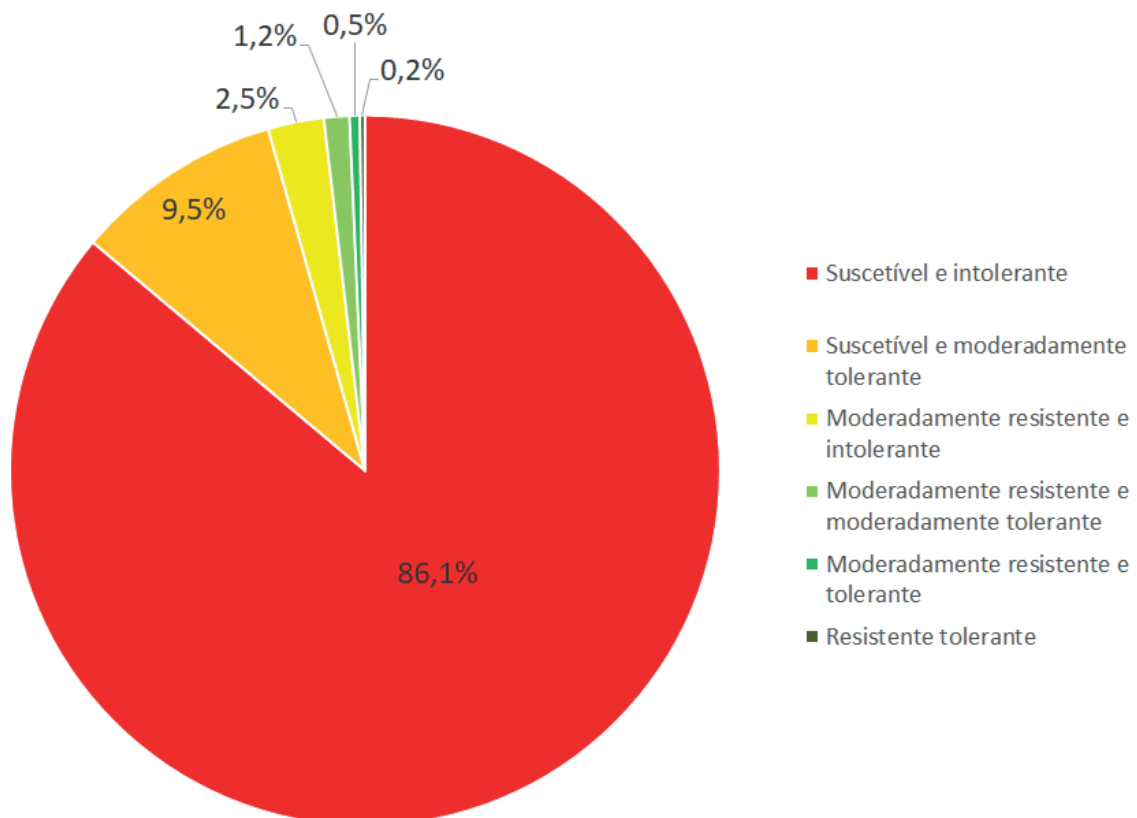


Figura 9. Percentual de resistência e tolerância ao barley yellow dwarf virus de cultivares de trigo. As inoculações do vírus foram realizadas com afídeos (*M. dirhodum*) virulíferos, em plantas no estágio de duas folhas. N=432. Extraído e adaptado de Caetano (1972).

com reduções médias de produtividade ao redor de 28 % (LAU et al. 2021a). Assim, considerando a presença de inóculo empregada em tais testes, a tolerância ao vírus parece ser um mecanismo importante para explicar a menor redução de produtividade.

O principal efeito da infecção por BYDV-PAV nas cultivares de trigo brasileiras é a redução no rendimento total de grãos, chegando a 60,8 % em cultivares intolerantes, resultado da redução de matéria seca, estatura, número médio de perfilhos, número médio de grãos e peso de mil grãos (LANZARINI et al. 2007). Em testes de cultivares de trigo atuais, em uma série histórica dos últimos 10 anos, envolvendo os materiais mais utilizados no Rio Grande do Sul Santa Catarina e sul do Paraná, a classe de dano a produtividade de grãos mais frequente está entre 30 e 40 %, com cultivares intolerantes com uma média de danos de aproximadamente 80 %, mesmo as cultivares mais tolerantes disponíveis atualmente têm danos médios de 20 % (LAU et al. 2021a). Embora esses danos potenciais ainda sejam elevados, a frequência de materiais intolerantes é muito inferior aos mais de 85 % relatados por Caetano em 1972.

Em relação a outros cereais de inverno, em aveia branca sob infecção mista por BYDV-PAV e BYDV-MAV, o peso de mil grãos pode ser reduzido até 72,4 % em cultivares suscetíveis, a estatura pode reduzir até 69,9 % e o número de perfilhos pode aumentar ou diminuir conforme a cultivar (NICOLINI-TEIXEIRA et al. 2006). Para cevada também são observadas variações na resposta das cultivares a infecções por BYDV (TONET & ARIAS 1999). Em geral, as cultivares de cevada atualmente indicadas são suscetíveis e intolerantes à infecção viral, sendo que infecções ocorridas no início do desenvolvimento das plantas podem resultar em danos ao rendimento de grãos superiores a 90 % (LAU et al. 2020a). As principais cultivares brasileiras de triticales são suscetíveis e intolerantes ao BYDV-PAV, e exibem sintomas típicos da virose quando infectados. Os danos médios a produtividade de grãos é de 72,6 %, variando de 60,3 % a 96,5 %. Já os genótipos de centeio apresentam tolerância a infecção por BYDV-PAV. A cultivar BRS Serrano mantém a mesma produção quando se compara plantas saudáveis e infectadas. O maior dano observado é de 28,2 % em cultivares tolerantes (LAU et al. 2012).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após mais de 50 anos de seu relato oficial no Brasil, o patossistema gramíneas - barley yellow dwarf virus - afídeos passou por mudanças e adaptações. Os avanços tecnológicos que resultaram na alteração da paisagem natural, as soluções para cultivo e manejo que modificaram a composição de espécies vegetais ao longo do ano foram o pano de fundo para afídeos vetores e vírus que aqui chegaram e ao longo das transformações foram se adaptando. Das primeiras observações escritas na primeira metade do século XX, a fase de crescimento desequilibrado nas décadas de 1960 e 1970 ao novo ponto de equilíbrio dos anos 1980 em diante, os componentes do sistema foram sendo decifrados pelas tecnologias disponíveis. Esse patossistema permanece relevante ainda hoje pelos danos que causa e pelos padrões de oscilação que em determinados anos podem requerer um manejo mais específico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório Multiusuário da Embrapa pelo suporte computacional e analítico.

REFERÊNCIAS

- ALVES LFA, PRESTES TM, ZANINI A, DALMOLIN MF, JUNIOR ADOM (2005). Natural biological control of aphids (Hemiptera: Aphididae) in a wheat field by parasitoids (Hymenoptera, Aphidiinae) in Medianeira, PR, Brazil. *Semina: Ciências Agrárias* 26:155-160. (<http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2005v26n2p155>).
- AMBROSI I (Org.). Avaliação dos impactos sociais e econômicos das tecnologias geradas pelo Centro Nacional de Pesquisa de trigo (1987). Passo Fundo: Embrapa, 1987. 38p. (Embrapa-CNPT, Documentos, 3).
- ARADOTTIR GI, CRESPO-HERRERA L (2021). Host plant resistance in wheat to barley yellow dwarf viruses and their aphid vectors: a review. *Current Opinion in Insect Science*, 45:59-68. (doi: 10.1016/j.cois.2021.01.002).
- BARBIERI RL, CARVALHO FIF de, BARBOSA NETO JF, CAETANO V da R, MARCHIORO VS, AZEVEDO R de, LONRECETTI C (2001). Análise dialéctica para tolerância ao vírus-do-nanismo-amarelo-da-cevada em cultivares brasileiras de trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35:131-135. (<https://doi.org/10.1590/S0034-73452001000300010>).

- org/10.1590/S0100-204X2001000100016).
- BERTELS A (1956). Entomologia agrícola sul-brasileira. Série Didática 16, Serv. Inf. Agric., Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro. 458 p.
- BERTELS A (1970). Pragas do trigo no campo e seu combate. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 5:81-89.
- BERTELS A (1974). Observações sobre a dinâmica de populações de afídeos em trigo no Rio Grande do Sul em 1971. Pesquisa Agropecuária Brasileira 9:71-72.
- BIANCHIN V (2008). Ocorrência do Barley yellow dwarf virus e Cereal yellow dwarf virus, transmissibilidade do BYDV-PAV pelo pulgão *Rhopalosiphum padi* e reação de cultivares de trigo ao complexo vírus/vetor. Dissertação de Mestrado. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo. 107 fls.
- BILIBIO MI, SALVADORI JR, LAU D, FERNANDES JMC, PEREIRA PRV da S (2021). Manejo de afídeos e nanismo-amarelo em trigo: eficácia em três safras. Passo Fundo, RS: Embrapa Trigo. 19 p. (Embrapa Trigo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento online, 99).
- BISNIEKS M, KVARNHEDEN A, SIGVALD R, VALKONEN JP (2004). Molecular diversity of the coat protein-encoding region of Barley yellow dwarf virus-PAV and Barley yellow dwarf virus-MAV from Latvia and Sweden. Archives of Virology 149:843-853. (doi:10.1007/s00705-003-0242-2).
- BORTOLOTTO OC, JÚNIOR ADOM, SAMPAIO MV, HOSHINO AT (2012). Parasitoides de pulgões-do-trigo que ocorrem no Norte do estado do Paraná e recaptura de *Aphidius rhopalosiphi* no Brasil. Semina: Ciências Agrárias, 33:3075-3080. (http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n6Supl2p3075).
- BOULILA M (2011). Selective constraints, molecular recombination structure and phylogenetic reconstruction of isometric plant RNA viruses of the families Luteoviridae and Tymoviridae. Biochimie 93:242-253. (doi:https://doi.org/10.1016/j.biochi.2010.09.017).
- CAETANO V da R (1968). Nota prévia sobre a ocorrência de uma virose em cereais de inverno no Rio Grande do Sul. Revista da Sociedade Brasileira de Fitopatologia 2:53-66.
- CAETANO V da R (1972). Estudo sobre o vírus do nanismo amarelo da cevada, em trigo, no Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”. Piracicaba. 75fls.
- CAETANO V da R, CAETANO V da R (1972). Comportamento de variedades e linhagens de trigo, quando inoculados artificialmente com o vírus do nanismo amarelo da cevada. [Pelotas, IPEAS, 1972]. Trabalho apresentado na V Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Fitopatologia, Fortaleza, p. 1.
- CAETANO V da R (1973). Estudos sobre os afídeos vetores do Vírus do Nanismo Amarelo da Cevada, em especial de *Acyrtosiphon dirhodum*, em trigo no Sul do Brasil. Tese Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.
- CAETANO V da R, GOLO RS (1980). Ocorrência do vírus do nanismo amarelo da cevada no Paraná, 1979. Fitopatologia Brasileira 5:389-390.
- CAETANO V da R, VIEGAS V dos S (1980). Suscetibilidade de cultivares de cevada ao vírus do nanismo amarelo da cevada. In: Reunião de Cevada, Resumos... Passo Fundo, RS, p. 20.
- CAETANO V da R (1982) Viroses. In: Osório EA (Ed.) Trigo no Brasil, 2nd edn. Fundação Cargill, Campinas. pp. 545-579.
- CEZARE DG de (2009). Análise da resistência e da tolerância da cultivar de trigo BRS Timbaúva ao Barley yellow dwarf virus-PAV. Dissertação de Mestrado. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, RS, Brasil.
- CEZARE DG de, SCHONS J, LAU D (2011). Análise da resistência/tolerância da cultivar de trigo BS Timbaúva ao Barley yellow dwarf virus - PAV. Tropical Plant Pathology, 36:249-255. (https://doi.org/10.1590/S1982-56762011000400006).
- COMEAU A, HABER S (2002). Breeding for BYDV tolerance in wheat as a basis for multiple stress tolerance strategy. Barley Yellow Dwarf Disease: Recent Advances and Future Strategies.
- DE MORI C, FONTANELI RS, SANTOS HP dos (2012). Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da aveia. Passo Fundo: Embrapa Trigo (Embrapa Trigo. Documentos Online, 136).
- ENGEL E, LAU D, GODOY WAC, PASINI MPB, MALAQUIAS JB, SANTOS CDR, PIVATO J (2021). Oscillation, synchrony, and multi-factor patterns between cereal aphids and parasitoid populations in southern Brazil. Bulletin of Entomological Research 1-8. (https://doi.org/10.1017/S0007485321000729.)
- FAGUNDES AC (1971). Espécie de pulgão verde predominante em trigo no Rio Grande do Sul, *Acyrtosiphon dirhodum* (Walker) Homoptera Aphididae, descrição e controle com inseticidas

- sistêmicos. *Revista Agronômica Sulriogradense* 3:99-113.
- FEHN LM (1970). Estudos da ação de inseticidas granulados, sistêmicos e de profundidade, no controle de pulgões em trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 5:259-284.
- FEHN LM (1974). Espécies de pulgões observadas em trigo no Rio Grande do Sul em 1971, seu combate e suas diferentes influências sobre a produção. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 9:73-80.
- FLOSS EL (1988). Aveia. In: BAIER AC, FLOSS LE, AUDE MI (Eds). **As lavouras de inverno**. Rio de Janeiro: Globo. pp. 17-74.
- FLOSS EL, VÉRAS AL, FORCELINI CA, GOELLNER C, GUTKOSKI LC, GRANDO MF, BOLLER W (2007). Programa de pesquisa de aveia da UPF “30 anos de atividades – 1977-2007”. *Revista Plantio Direto*.
- GASSEN DN, TAMBASCO FJ (1983). Controle biológico dos pulgões do trigo no Brasil. *Informe Agropecuário* 104, pp. 49–51.
- GASSEN DN (1984). Insetos associados à cultura do trigo no Brasil. EMBRAPA/CNPT. Passo Fundo. Circular Técnica 3.
- GASSEN DN (1986). Parasitos, patógenos e predadores de insetos associados à cultura do trigo. Passo Fundo: EMBRAPA/CNPT. 86 p. (Circular Técnica).
- GASSEN DN (1988). Controle Biológico de Pulgões de Trigo. Passo Fundo: EMBRAPA/CNPT, Documentos n. 3, 13p.
- GASSEN DN (1999). Controle biológico de pulgões de trigo no Brasil. Passo Fundo: CNPT, Comunicado Técnico 15.
- GRAVENA S (1979). Dinâmica populacional do pulgão verde *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852) (Homoptera, Aphididae) e inimigos naturais associados ao sorgo granífero em Jaboticabal, SP, Brasil. *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil* 8: 325–334.
- GONÇALVES M, GODINHO M, ALVES-FREITAS D, VARSANI A, RIBEIRO S (2017). First report of maize yellow mosaic virus infecting maize in Brazil. *Plant Disease* 101:2156. (<https://doi.org/10.1094/PDIS-04-17-0569-PDN>).
- GOMEZ SA, RUMIATTO M (1989a). Avaliação do controle biológico de *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852) por parasitos alienígenas introduzidos. Reunião da Comissão Centro-Sul-brasileira de pesquisa do trigo. Resultados da pesquisa com trigo-1988. UEP/PAED – EMBRAPA Agropecuária Oeste 39: 163–164 (Documentos).
- HALL GS, LITTLE DP (2013). Within-host competition between barley yellow dwarf-PAV and -PAS. *Virus Research* 174:148-151.
- JAROŠOVÁ J, CHRPOVÁ J, ŠÍP V, KUNDU J (2013). A comparative study of the Barley yellow dwarf virus species PAV and PAS: distribution, accumulation and host resistance. *Plant Pathology* 62 :436-443. (<https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2012.02644.x>).
- JIN Z, WANG X, CHANG S, ZHOU G (2004). The complete nucleotide sequence and its organization of the genome of Barley yellow dwarf virus-GAV. *Science in China Series C: Life Sciences* 47:175-182. (doi:10.1360/03yc0076).
- KOBER EAM (1972). Combate aos pulgões que atacam o trigo. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul – Supervisão da Produção Vegetal – Unidade de Defesa e Fomento – Equipe de Defesa Fitossanitária.
- LANZARINI AC, SCHONS J, SALVADORI JR, NIENOW AA, NICOLINI-TEIXEIRA F, BINOTTO-MISSIURA F, DEUNER E (2007). Avaliação de danos causados pelo Barley yellow dwarf virus: PAV em cultivares de trigo no Brasil. *Fitopatologia Brasileira* 32:512-517. (<https://doi.org/10.1590/S0100-41582007000600011>).
- LAU D, PEREIRA PRV da S, SALVADORI JR, SCHONS J, PARIZOTO G, MAR TB (2009). Ocorrência do Barley/Cereal yellow dwarf virus e seus vetores em cereais de inverno no Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e Mato Grosso do Sul em 2008. Passo Fundo: Embrapa Trigo. Comunicado Técnico Online 256.
- LAU D, SANTANA FM, MACIEL JLN, FERNANDES JMC, COSTAMILAN LM, CHAVES MS, LIMA MIPM (2011). Doenças de trigo no Brasil. In: PIRES JLF, VARGAS L, CUNHA GR da (Eds.). *Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, pp. 283-324.
- LAU D, NASCIMENTO JUNIOR A do, PEREIRA PRV da S, SBRISSE E, CARMINATTI AJ (2012). Reação de genótipos de triticale (X Triticosecale Wittmack) e de centeio (*Secale cereale* L.) ao BYDV-PAV, agente causal do nanismo amarelo: análise de dados do ano de 2011. Passo Fundo: Embrapa Trigo. Comunicado Técnico Online 312.
- LAU D, PEREIRA PRV da S, MINELLA E (2020a). Reação de Cultivares e Linhagens de Cevada ao Barley yellow dwarf virus-PAV, em 2018. Passo Fundo: Embrapa Trigo: Comunicado Técnico Online 376.

- LAU D, SBALCHEIRO CC, MARTINS FC, SANTANA FM, MACIEL JLN, FERNANDES JMC, COSTAMILAN LM, LIMA MIPM, KUHNEM P, CASA RT (2020b). Principais doenças do trigo no sul do Brasil: diagnóstico e manejo. Passo Fundo: Embrapa Trigo: Comunicado Técnico Online 375.
- LAU D, MAR TB, CASTRO RL de (2021a). Reação ao BYDV-PAV de cultivares de trigo do ensaio estadual do Rio Grande do Sul, em 2020. Passo Fundo: Embrapa Trigo: Comunicado Técnico Online 381.
- LAU D, MAR TB, SANTOS CDR dos, ENGEL E, PEREIRA PRV da S (2021b). Advances in understanding the biology and epidemiology of barley yellow dwarf virus (BYDV). In: OLIVER R, CURTIN J (Eds). Achieving durable disease resistance in cereals. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publ. pp.1-37.
- LÁZZARI SN (1985). Inimigos naturais dos afídeos (Homoptera: Aphididae) da cevada (*Hordeum* sp.) no Paraná. Anais da Sociedade Entomológica do Brasil 14 1:5–15. (<https://doi.org/10.37486/0301-8059.v14i1.362>)
- LEFKOWITZ EJ, DEMPSEY DM, HENDRICKSON RC, ORTON RJ, SIDDELL SG, SMIT DB (2018). Virus taxonomy: the database of the International Committee on Taxonomy of Viruses (ICTV). Nucleic Acids Research 46:708-717. (<https://doi.org/10.1093/nar/gkx932>).
- LIU F, WANG X, LIU Y, XIE J, GRAY SM, ZHOU G, GAO B (2007). A Chinese isolate of barley yellow dwarf virus-PAV represents a third distinct species within the PAV serotype. Archives of Virology 152:1365-1373. (doi:10.1007/s00705-007-0947-8).
- LIU Y, ZHAI H, ZHAO K, WU B, WANG X (2012). Two suppressors of RNA silencing encoded by cereal-infecting members of the family Luteoviridae. Journal of General Virology 93:1825–1830. (<https://doi.org/https://doi.org/10.1099/vir.0.042135-0>).
- LIU Y, KHINE M O, ZHANG P, FU Y, WANG X (2020). Incidence and distribution of insect-transmitted cereal viruses in wheat in China from 2007 to 2019. Plant Disease 104: 1407–1414. (<https://doi.org/10.1094/PDIS-11-19-2323-RE>).
- MACHADO CC de L, SANTOS RSS dos (2013). Pulgões do trigo e ação de parasitoides em Augusto Pestana, Noroeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Revista Brasileira de Agroecologia 8:179-186.
- MAYO MA (2002). virology division news: ICTV at the Paris ICV: Results of the Plenary Session and the Binomial Ballot. Archives of Virology 147:2254-2260. (doi:10.1007/s007050200052).
- MALMSTROM CM, SHU R (2004). Multiplex RT-PCR for streamlined detection and separation of Barley and Cereal yellow dwarf viruses. Journal of Virological Methods 120: 69-78. (<https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2004.04.005>).
- MAR TB, LAU D, SCHONS J, YAMAZAKI-LAU E, NHANI JR A (2013). Molecular identification based on coat protein sequences of the Barley yellow dwarf virus from Brazil. Scientia Agricola 70:428-434. (<https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000600008>).
- MELLO I, VAN RAIJ B (2006). No-till for sustainable agriculture in Brazil. Proceedings of World Association of Soil and Water Conservation Paper 1:49-57.
- MILLER WA, RASOCHOVÁ L (1997). Barley yellow dwarf viruses. Annual Review of Phytopathology 35:167–190. (<https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.35.1.167>).
- MILLER WA, WATERHOUSE PM, GERLACH WL (1988). Sequence and organization of barley yellow dwarf virus genomic RNA. Nucleic Acids Research 16:6097-111. (doi: 10.1093/nar/16.13.6097).
- NAJAR A, HAMD I, VARSANI A (2017). Barley yellow dwarf virus in barley crops in Tunisia: prevalence and molecular characterization. Phytopathologia Mediterranea 56:111-118. (https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-19308).
- NICOLINI-TEIXEIRA F, SCHONS J, COLOMBO CR, SOUZA R (2006). Avaliação do Barley yellow dwarf virus em genótipos de aveia. Revista Brasileira de Agrociência 12:423-427.
- OSWALD JW, HOUSTON BR (1951). A new virus disease of cereals, transmissible by aphids. Plant Disease Reporter 35:471–475
- PAGAN I, HOLMES E C (2010). Long-term evolution of the Luteoviridae: time scale and mode of virus speciation. Journal of Virology 84:6177-6187. (doi:10.1128/jvi.02160-09).
- PARCEVAL M von (1939). Contribuição para o estudo do fenômeno da amarelidão nos triguais do sul do estado do Rio Grande do Sul. Secretaria de Estado dos Negócios da Agricultura Indústria e Comércio. Porto Alegre (RS). Boletim 76.
- PARIZOTO G (2011). Flutuação sazonal de B/CYDV e características biológicas de isolados de BYDV-PAV. Dissertação de Mestrado. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, RS, Brasil.
- PARIZOTO G, REBONATTO A, SCHONS J, LAU D (2013). Barley yellow dwarf virus-PAV in Brazil: seasonal fluctuation and biological characteris-

- tics. *Tropical Plant Pathology* 38:11-19. (<https://doi.org/10.1590/S1982-56762013000100002>).
- PARRY HR, MACFADYEN S, KRITICOS, DJ (2012). The geographical distribution of yellow dwarf viruses and their aphid vectors in Australian grasslands and wheat. *Australasian Plant Pathology* 41: 375–387. (<https://doi.org/10.1007/s13313-012-0133-7>)
- PEREIRA PRV da S, LAU D, SALVADORI JR, CARVALHO RCZ de, LAMPERT S (2009). Siphia (Rungisia) maydis Passerini, 1860 (Hemiptera, Aphididae): o pulgão-preto-dos-cereais. In: Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, Atas e Resumos...Veranópolis, RS, Brasil.
- PEREIRA PRV da S, LAU D, MARSARO JÚNIOR AL (2016). Dinâmica populacional de afídeos vetores de BYDV: impactos ao rendimento de grãos em trigo. In: 10ª Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, Resumos...Londrina, PR, Brasil.
- PERUZZO R, SALVADORI JR, PEREIRA PRV da S, BERTOLLO EC, TONELLO LS (2007). Resposta de cultivares de trigo à infestação do pulgão *Rhopalosiphum padi*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 42:1681-1685. (<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001200003>).
- PIMENTA HR, SMITH JG (1976). Afídeos, seus danos e inimigos naturais em plantações de trigo (*Triticum* sp.) no estado do Paraná. Curitiba: OCEPAR 175p.
- PORRAS MF, NAVAS CA, MARDEN JH, MESCHER MC, DE MORAES CM, PINCEBOURDE S, SANDOVAL-MOJICA A, RAYGOZA-GARAY JA, HOLGUIN GA, RAJOTTE EG, CARLO TA (2020). Enhanced heat tolerance of viral-infected aphids leads to niche expansion and reduced interspecific competition. *Nature Communications* 11:1184. (<https://doi.org/10.1038/s41467-020-14953-2>).
- REBONATTO A, SALVADORI JR, LAU D (2015). Temporal changes in cereal aphids (Hemiptera: Aphididae) populations in northern Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Agricultural Science* 7:7178. (<http://dx.doi.org/10.5539/jas.v7n10p71>).
- REINIGER CH (1941). Uma ameaça para os triguais do Sul. *Combate biológico dos pulgões (afídeos). Chácaras e Quintais* 64:697-9.
- ROCHOW WF (1969). Biological properties of four isolates of barley yellow dwarf virus. *Phytopathology* 59:1580–89.
- ROCHOW WF, MULLER I (1971). A fifth variant of barley yellow dwarf virus in New York. *Plant Disease* 55:874–77.
- ROBERTSON NL, FRENCH R (2007). Genetic structure in natural populations of barley/cereal yellow dwarf virus isolates from Alaska. *Archives of Virology* 152:891-902. (<https://doi.org/10.1007/s00705-006-0913-x>).
- RONQUIM JC, PACHECO JM, RONQUIM CC (2004). Occurrence and parasitism of aphids (Hemiptera: Aphididae) on cultivars of irrigated oat (*Avena* spp.) in São Carlos, Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 47:163–169. (<https://doi.org/10.1590/S1516-89132004000200001>).
- ROSA O de S (1988). Controle integrado de doenças e de pragas do trigo no Rio Grande do Sul: desenvolvimento, resultados e perspectivas. Passo Fundo: Embrapa-CNPT: Documentos 9.
- ROZA-GOMES MF, SALVADORI JR, SCHONS J (2008). Danos de *Rhopalosiphum padi* (L.) (Hemiptera: Aphididae) no trigo em função da duração e da densidade de infestação. *Neotropical Entomology* 37:577-581. (<https://doi.org/10.1590/S1519-566X2008000500013>).
- SALVADORI JR, PEREIRA PRV da S, VOSS M (2006). Controle biológico de pragas do trigo. In: PINTO A de S, NAVA DE, ROSSI MM, MALERBO-SOUZA DT (Eds). *Controle Biológico de Pragas: na prática*. Piracicaba. pp. 55-63.
- SALVADORI JR, TONET GL (2001). Manejo integrado dos pulgões de trigo, EMBRAPA/CNPT, Passo Fundo: Documentos 34.
- SALVADORI JR, SALLES LAB (2002). Controle Biológico dos Pulgões do Trigo. In: PARRA JRP, BOTELHO PSM, FERREIRA BSC, BENTO JMS (Eds.) *Controle Biológico no Brasil: parasitoides e predadores*. São Paulo: Manole pp. 427-447.
- SANTOS, CDR (2020). Parasitoides de afídeos de cereais no planalto do Rio Grande do Sul; aspectos taxonômicos e populacionais. 74 Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de pós-graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, RS.
- SAVARIS M, LAMPERT S, SALVADORI JR, LAU D, PEREIRA PRV da S, SMANIOTTO MA (2013). Population growth and damage caused by *Rhopalosiphum padi* (L.) (Hemiptera, Aphididae) on different cultivars and phenological stages of wheat. *Neotropical Entomology* 5:539-543. (<https://doi.org/10.1007/s13744-013-0158-9>).
- SCHONS J, DALBOSCO M (1999). Identificação das

- estirpes do vírus do nanismo amarelo da cevada. *Revista Brasileira de Fitopatologia* 24:359. Suplemento, ref. 680. Edição dos Resumos do XXXII Congresso Brasileiro de Fitopatologia, Curitiba.
- SILVA AG d'A, GONÇALVES CR, GALVÃO DM, GONÇALVES AJL, GOMES J, SILVA M do N, SIMONI L de (1968). Quarto catálogo dos insetos que vivem nas plantas do Brasil—Seus parasitas e predadores. Parte II, Vol. 1. Rio de Janeiro: Minist. Agric. pp. 622.
- SILVA MTB, COSTA EC, BALARDIN RS (2004). Reação de cultivares e eficiência do controle químico de pulgões vetores do Barley yellow dwarf virus em trigo. *Ciência Rural* 34:1333-1340. (<https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000500003>)
- SMIRNOVA E, FIRTH AE, MILLER WA, SCHEIDECKER D, BRAULT V, REINBOLD C, RAKOTONDRAFARA AM, CHUNG BYW, ZIEGLER-GRAFF V (2015). Discovery of a small non-AUG-initiated ORF in Poleroviruses and Luteoviruses that is required for long-distance movement. *PLOS Pathogens* 11:e1004868. (<https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1004868>).
- STARÝ P, SAMPAIO MV, BUENO VHP (2007). Aphid parasitoids (Hymenoptera, Braconidae, Aphidiinae) and their associations related to biological control in Brazil. *Revista Brasileira de Entomologia*, 51:107-118. (<https://doi.org/10.1590/S0085-56262007000100018>).
- STEMPKOWSKI LA, MAR TB, PEREIRA FS, SANTOS AKA, VALENTE JB, LAU D, CASA RT, SILVA FN da. (2022). Viroses em trigo no Brasil: uma visão histórica. *Revisão Anual de Patologia de Plantas*, 28: 102-135. (<https://doi.org/10.31976/0104-038321v280005>).
- STOETZER A, KAWAKAMI J, MARSARO JÚNIOR AL, LAU D, PEREIRA PRV da S, ANTONIAZZI N (2014). Protective effect and economic impact of insecticide application methods on barley. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 49:153-162. (<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000300001>).
- TAMBASCO FJ (1984). Determinação de níveis de dano de pulgões em trigo. Passo Fundo: EMBRAPA/CNPT, Circular Técnica.
- TONET GL, SILVA RFP da (1994). Antibiose de genótipos de trigo ao biótipo C do “pulgão-verde-dos-cereais”, *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852) (Homoptera: Aphididae). *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 29:1181-1186.
- TONET GL, SILVA RFP da (1995a). Resistência de genótipos de trigo ao pulgão-verde-dos-cereais *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852) (Hom., Aphididae). *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 30:299-306.
- TONET GL, SILVA RFP da (1995b). Resistência de genótipos de trigo ao biótipo C de *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852) (Homoptera, Aphididae). *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 30:1283-1287.
- TONET GL, ARIAS G (1999). Reação de genótipos de cevada ao vírus do nanismo amarelo da cevada (VNAC). In: 19ª Reunião Anual de Pesquisa de Cevada. Resumos... Passo Fundo: Embrapa Trigo pp. 85-87.
- UENG PP, VINCENT JR, KAWATA EE, LEI C-H, LISTER RM, LARKINS BA (1992). Nucleotide sequence analysis of the genomes of the MAV-PS1 and P-PAV isolates of barley yellow dwarf virus. *Journal of General Virology* 73:487-492. (<https://doi.org/10.1099/0022-1317-73-2-487>).
- VAN DEN EYNDE R, VAN LEEUWEN T, HAESAERT, G (2020). Identifying drivers of spatio-temporal dynamics in barley yellow dwarf virus epidemiology as a critical factor in disease control. *Pest Management Science* 76: 2548–2556. (<https://doi.org/10.1002/ps.5851>).
- WU B, BLANCHARD-LETORT A, LIU Y, ZHOU G, WANG X, ELENA SF (2011). Dynamics of molecular evolution and phylogeography of Barley yellow dwarf virus-PAV. *PLoS ONE* 6:e16896. (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016896>).
- ZÚÑIGA-SALINAS ES (1982). Controle biológico dos afídeos do trigo (Homoptera: Aphididae) por meio de parasitóides no Planalto Médio do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.
- ZANINI A, PRESTES TMV, DALMOLIN MF, ALVES LFA, MENEZES JÚNIOR AO. (2006a). Ocorrência de *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson) (Hymenoptera, Aphidiinae) parasitando pulgões (Hemiptera: Aphididae), em trigo em Medianeira, PR. *Neotropical Entomology* 35:275-276. (<https://doi.org/10.1590/S1519-566X2006000200020>).
- ZANINI A, ALVES LFA, MENEZES AO, PRESTES TMV (2006b). Aspectos ecológicos de *Aphidius colemani* Viereck (Hymenoptera: Aphidiidae) sobre a população de *Sitobion avenae* (Fabricius) (Hemiptera: Aphididae) na cultura de trigo em Medianeira, PR. *Semina* 27:185-198.